



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ**

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

**ÚSTAV VÝROBNÍCH STROJŮ, SYSTÉMŮ A ROBOTIKY**

INSTITUTE OF PRODUCTION MACHINES, SYSTEMS AND ROBOTICS

**NÁVRH MOBILNÍHO ROBOTU**

MOBILE ROBOT DESIGN

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

MASTER'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

Bc. Michal Valík

doc. Ing. Radek Knoflíček, Dr.

BRNO 2017



# Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky  
Student: **Bc. Michal Valík**  
Studijní program: Strojní inženýrství  
Studijní obor: Výrobní stroje, systémy a roboty  
Vedoucí práce: **doc. Ing. Radek Knoflíček, Dr.**  
Akademický rok: 2016/17

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

## Návrh mobilního robotu

### Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Záměrem práce je navrhnout prototyp mobilního robotu tzv. univerzitní konstrukce, mající vysokou užitnou hodnotu za co nejmenší náklady.

### Cíle diplomové práce:

1. Provedte literární nebo internetovou rešerši stávajícího stavu v oblasti konstrukce a aplikace mobilních robotů s kolovými nebo pásovými podvozky v oblasti výzkumu a vývoje na technických univerzitách.
2. Na základě vyhodnocení rešerše proveďte vlastní návrh (koncepti) konstrukce mobilního robotu (kolového nebo pásového) pro podmínky realizace případné výroby v dílnách ústavu s tím, že mobilní robot musí být schopen jízdy po pevné podložce a překonávat výškové překážky nanejvýše 30 mm a projede dveřmi o šířce nejméně 600 mm. Možnost vjetí a vyjetí z/do výtahu všech budov v areálu FSI uvažujte také.
3. Návrh mobilní robotu proveďte pouze jako elektromechanickou konstrukci (machineware).
4. Vypracujte potřebné návrhové výpočty (dimenzování pohonné jednotky, akumulátory, případnou sensoriku atd.).
5. Vypracujte úplnou výkresovou dokumentaci.
6. Vypracujte analýzu rizik pro práci v laboratorních podmínkách ústavu
7. Vypracujte stručné hodnocení nákladů na výrobu jednoho kusu – prototypu.

### Seznam doporučené literatury:

SMRČEK Jiří a Ladislav KÁRNÍK. Robotika - Servisné roboty: Navrhovanie - konštrukcia – riešenia. 1. vydání Prešov, Vydavateľstvo Michala Vaška, 2008. ISBN 978-80-7165-713-2.

NOVÁK, Petr. Mobilní roboty: pohony, senzory, řízení. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2005. ISBN 80-7300-141-1.

KOLÍBAL, Zdeněk. Roboty a robotizované výrobní technologie. První vydání. Brno: Vysoké učení technické v Brně - nakladatelství VUTIAM, 2016. ISBN 978-80-214-4828-5.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2016/17

V Brně, dne

L. S.

---

doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D.  
ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
děkan fakulty

## **ABSTRAKT**

Tato diplomová práce se zabývá návrhem mechanické konstrukce mobilního robotu. Cílem je sestavit kompletní výkresovou dokumentaci k výrobě prototypu. Teoretická část práce analyzuje současný stav mobilních robotů. V praktické části jsou navrženy všechny mechanické celky pásového podvozku včetně návrhových výpočtů. Závěrečná práce dále obsahuje analýzu rizik, cenové zhodnocení a kompletní výkresovou dokumentaci zkonstruovaného zařízení včetně 3D modelu.

## **ABSTRACT**

This diploma thesis deals with design of machinware of mobile robot. The purpose of this work is to design complete technical product documentation for manufacturing of a prototype. In first theoretical part of this thesis there is an analysis of contemporary situation of mobile robots. In second practical section, there is a design of all needed mechanical parts for tracked vehicle, all needed calculations are included. Diploma thesis contains hazard analysis, complete technical product documentation with 3D model included and final price statement.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Mobilní robot, pásový podvozek, návrh mechanické konstrukce, laboratorní prototyp

## **KEYWORDS**

Mobile robot, tracked vehicle, design of machinware, laboratory prototype



## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

VALÍK, M. *Návrh mobilního robotu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2017. 91 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Radek Knoflíček, Dr..





## **PODĚKOVÁNÍ**

Rád bych poděkoval svému vedoucímu práce panu doc. Ing. Radku Knoflíčkovi, Dr., za důležité technické rady a podporu během zpracovávání diplomového tématu. Dále patří nemalý dík mé přítelkyni, rodině a blízkým, kteří mě během celého studia plně podporovali a stáli pře mě v těžkých chvílích.



## **ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ**

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením doc. Ing. Radka Knoflíčka, Dr., a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 26.05.2017

.....

Valík Michal



# OBSAH

<b>1</b>	<b>ÚVOD .....</b>	<b>15</b>
<b>2</b>	<b>PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ.....</b>	<b>19</b>
2.1	Mobilní servisní robot.....	19
2.1.1	Rozdělení MSR dle systémového a klasického pohledu .....	19
2.1.2	Rozdělení dle podvozku a lokomoce MSR .....	20
2.1.3	Servisní roboty s kolovým podvozkem .....	21
2.1.4	Servisní roboty s pásovým podvozkem .....	24
2.2	Výběr konstrukcí mobilních robotů s kolovými nebo pásovými podvozky .....	27
2.2.1	Modulární pásový podvozek s proměnlivou kinematikou pásu .....	27
2.2.2	Mobilní kolový robot pro monitoring.....	28
2.2.3	Čtyřkolový robot s Weinsteinovými koly .....	29
2.2.4	Hybridní pásový mobilní robot.....	29
2.2.5	Autonomní pásové schodolezy .....	30
2.2.6	Autonomní šplhací robot s taktilními koly .....	31
2.2.7	Mobilní kolový robot s excentrickými pádly na kolech .....	32
2.2.8	Athlete: Měsíční krácející kolový robot .....	33
2.2.9	Vesmírný robot s rozšířenými lezeckými schopnostmi.....	34
<b>3</b>	<b>KONSTRUKCE VLASTNÍHO NÁVRHU MOBILNÍHO ROBOTU .....</b>	<b>36</b>
3.1	Požadavkový list robotu a specifikace zadání .....	36
3.2	Návrh variant řešení robotu .....	36
3.2.1	Varianta A.....	36
3.2.2	Varianta B .....	37
3.2.3	Varianta C .....	37
3.2.4	Varianta D.....	38
3.2.5	Varianta E .....	39
3.3	Metoda multikriteriálního hodnocení .....	39
3.4	Výběr konstrukční varianty .....	41
<b>4</b>	<b>ROZBOR VYBRANÉ VARIANTY .....</b>	<b>43</b>
4.1	Čtyřpásový mobilní podvozek .....	43
4.2	Popis jednotlivých částí konstrukčního řešení.....	44
4.2.1	Mechanismus realizace pohybů pásového robotu .....	44
4.2.2	Návrh pohonu .....	45
4.2.3	Výběr pohonů a dílčích komponent.....	48
4.2.4	Sestava ramene pásu .....	52
4.2.5	Nosný rám.....	55
4.2.6	Sestava akumulátorů.....	57
4.2.7	Další komponenty .....	59
4.2.8	Vnější krytování podvozku.....	61
<b>5</b>	<b>ANALÝZA RIZIK .....</b>	<b>63</b>
5.1	Mezní hodnoty .....	63
5.2	Identifikace nebezpečí .....	64
5.3	Odhadnutí rizik .....	66
5.4	Zhodnocení rizik a bezpečnostní opatření .....	68
<b>6</b>	<b>ZHODNOCENÍ .....</b>	<b>69</b>
6.1	Výsledné parametry .....	69

6.2	Cenové zhodnocení .....	69
6.3	Rozbor pohybů robotu .....	71
<b>7</b>	<b>DISKUZE.....</b>	<b>73</b>
<b>8</b>	<b>ZÁVĚR.....</b>	<b>75</b>
<b>9</b>	<b>SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ .....</b>	<b>77</b>
<b>10</b>	<b>SEZNAM ZKRATEK, SYMBOLŮ, OBRÁZKŮ A TABULEK.....</b>	<b>81</b>
10.1	Seznam zkratk.....	81
10.2	Seznam obrázků.....	82
10.3	Seznam tabulek.....	84
<b>11</b>	<b>SEZNAM PŘÍLOH.....</b>	<b>85</b>

# 1 ÚVOD

V současném moderním světě je vývoj robotů a jejich konstrukcí velice aktuální téma. Člověk je čím dál tím častěji roboty nahrazován buď úplně, anebo alespoň využívá jejich možnosti pro svou potřebu. Mobilní robot je mechatronické zařízení, které má schopnosti se pohybovat po okolním prostředí a člověk tak může vhodně využít jeho schopnosti. Pro pohyb po prostoru používá nejčastěji kola nebo pásy a svou trajektorie dokáže ovládat buď zcela autonomně bez lidského zásahu, nebo pomocí dálkového ovládání obsluhy.

Tato zařízení nachází uplatnění nejčastěji při servisních, monitorovacích nebo laboratorních úlohách. Konkrétně např. u bezpečnostních složek a v oblastech vojenství, nebo zejména tam, kde by mohlo dojít ke zranění nebo ohrožení lidského zdraví. Současným trendem robotiky je sestavit komplexní inteligentní zařízení, které je díky vlastní jednoduché stavbě a elektronice využitelné pro konkrétní typ úlohy.

Téma diplomové práce je „Návrh mobilního robotu“. Tato závěrečná práce se zabývá návrhem mechanické konstrukce mobilního podvozku. Konkrétně jde o laboratorní mobilní robot, který má vzhledem k nízkým cenovým nákladům univerzální využití. Předpokládá se aplikace ve vnitřním prostředí za pomoci operátora a dálkového ovládání. Mechanická stavba robotu umožňuje změnu vlastní kinematiky, která vede k využití také při jízdě na nakloněné rovině nebo při jízdě po schodech.

V současné době existuje již několik desítek, ne-li stovek provedení, mobilních podvozků, cílem je se v dané problematice zorientovat a najít vhodné řešení, které by svými vlastnostmi převyšovalo nebo se alespoň vyrovnalo již hotovým konstrukcím. Úmyslem je navrhnout všestranný mobilní robot, který svou mechanickou stavbou umožní v budoucnu vytipovat konkrétní úlohu, pro kterou by bylo vhodné jej použít.









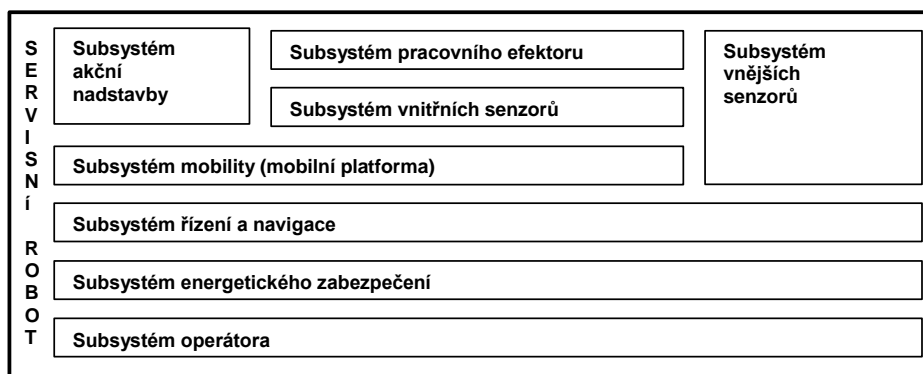
## 2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

### 2.1 Mobilní servisní robot

Mobilní servisní robot (dále jen MSR) lze chápat jako počítačem řízený integrovaný technický systém, který je schopen samostatného pohybu v prostoru pomocí vlastního lokomočního ústrojí. Je schopen autonomní, cílové, orientované interakce s reálným okolním prostředím pomocí prostředků umělé inteligence v souladu s instrukcemi operátora, případně podle jiných instrukcí. [1]

#### 2.1.1 Rozdělení MSR dle systémového a klasického pohledu

Z pohledu systémového přístupu lze MSR definovat jako strukturovaný inteligentní technický systém sestavený z funkčních a konstrukčně vázaných subsystémů. Jednotlivé subsystémy je možno dále rozčlenit na jednotlivé funkční a konstrukční podskupiny, agregáty a prvky. Zmíněné systémy a subsystémy společně tvoří jeden systémový model MSR – viz grafické zobrazení na obrázku č. 1 níže. [2]



Obr. 1) Systémový model servisního robotu [2]

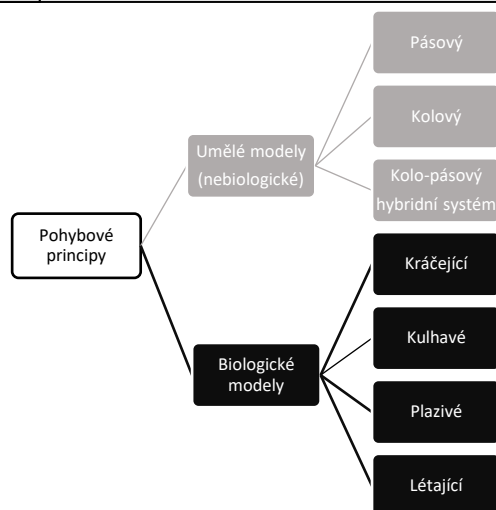
Na systémový pohled na MSR navazuje také „klasický“ pohled rozdělující složitý mechanismus MSR. Zejména se jedná o rozdělení na dva hlavní celky – mechanickou a elektronickou část. Toto rozdělení je možné vidět v tabulce 1. [2]

Tab 1) Systémový model servisního robotu, klasický mechanický přístup [2]

<b>MOBILNÍ SERVISNÍ ROBOT</b>	<b>Mechanická část</b> (machinware)	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Lokomoční mechanismus</li> <li>▪ Akční mechanismus (polohovací mechanismus, orientační mechanismus)</li> <li>▪ Koncový efektor</li> <li>▪ Systém výměny efektorů</li> <li>▪ Zásobník koncových efektorů</li> </ul>	<b>MACHINWARE</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- lokomoční ústrojí</li> <li>- vlastní pohonné jednotky</li> <li>- primární zdroj energie</li> <li>- elektrická palubní síť</li> <li>- signální palubní síť</li> <li>- účelová nadstavba</li> <li>- periferní vybavenost účelové nadstavby</li> </ul>
	<b>Řídicí část</b> (hardware, software, brainware)	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Zdroje energií</li> <li>▪ Energetické, řídicí rozvody</li> <li>▪ Řídicí systém</li> <li>▪ Vnitřní senzory</li> <li>▪ Vnější senzory</li> <li>▪ Panel operátora</li> <li>▪ SW pro řízení činnosti</li> <li>▪ SW pro plánování a procesní řízení</li> </ul>	<b>HARDWARE</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- měniče el. energie pro napájení pohonných jednotek</li> <li>- elektronika pro řízení pohonů</li> <li>- senzorické podsystémy</li> <li>- elektronika pro řízení senzorického podsystému</li> <li>- monitoring stavu zdrojů energie</li> <li>- vlastní řídicí systém MSR</li> <li>- jednotka styku s operátorem</li> </ul> <b>SOFTWARE, BRAINWARE</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- řízení lokomoce (pohybu)</li> <li>- plánování činnosti</li> <li>- navigace (lokální, globální)</li> <li>- řízení účelové nadstavby</li> </ul>

### 2.1.2 Rozdělení dle podvozku a lokomoce MSR

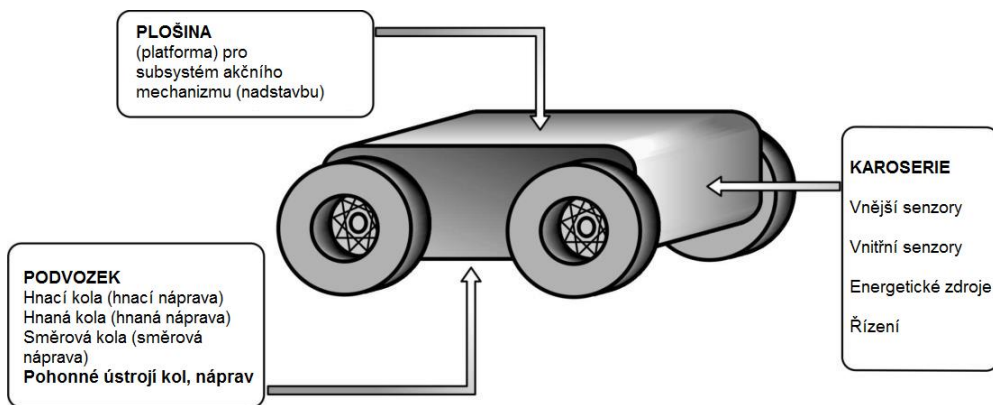
Podvozek je hlavní, funkční a konstrukční podskupinou reprezentující rám a lokomoční ústrojí robotu. Princip lokomoce výrazně ovlivňuje konstrukci celého MSR a lze jej rozdělit dle principů realizace funkce pohybu. Níže na obrázku č. 2 je znázorněno základní rozdělení pohybových principů, které vycházejí buď z biologických vzorů (v přírodě přirozené pohyby a mechanismy) nebo ze zdrojů umělých. [1]



Obr. 2) Rozdělení pohybových mechanismů mobilních robotů [1]

### 2.1.3 Servisní roboty s kolovým podvozkem

Jedná se o nejpočetnější skupinu mobilních robotů. Různorodost jednotlivých provedení konstrukce vyplývá z konkrétních aplikací a použití. Koncepce mohou být jednokolová až vícekolová, ale také s jednoduchým, složitým nebo speciálním uspořádáním částí kolového podvozku. Jednoznačnou výhodou servisních robotů s kolovým podvozkem je jejich univerzálnost, otevírající široký prostor využití. Mezi oblasti použití patří např. vojenství, zemědělství, bezpečnostní složky atd. Princip a konstrukce lokomočního ústrojí vychází z aplikace technického modelu kola a řízeného kolového podvozku pro požadovaný pohyb v prostoru. Systém umožňuje obecný pohyb po vodorovné a šikmé ploše ve směru závislém na geometrii podvozku. Specifikem je pohyb na principu mechaniky valení kol. Obrázek č. 3 níže zobrazuje kolový podvozek a jeho subsystémy. [Kolibal], [Smrčka]



Obr. 3) Schéma obecného modelu kolového MSR [2]

### Uspořádání a charakteristiky podvozku kolového robotu

Při řešení podvozku se využívají různá uspořádání hlavních funkčních podskupin (rám podvozku, nápravy, pohon apod.). Tímto vznikají různé typy struktur kolových podvozků, které se vzájemně odlišují uspořádáním náprav, různým počtem kol, hnacích a hnaných náprav a dalšími specifiky. Sestavované podvozky s různým počtem a typem kol mají odlišné charakteristiky, zejména pak trakční a lokomoční vlastnosti. Veškerých variant provedení se

následně využívá při optimalizaci lokomoční jednotky pro konkrétní typ aplikace. Mezi hlavní charakteristické konstrukční znaky uspořádání kolového podvozku patří:

- počet kol podvozku,
- příčný průřez kola (čtverec, obdélník, speciální tvar),
- povrch běhounové části kola (hladký, typ dezénového profilu),
- počet náprav na podvozku,
- počet řízených náprav na podvozku,
- počet hnacích náprav na podvozku,
- možnost vertikálního zdvihu kol,
- typ řízení podvozku, ...

Na základě využití mobilních servisních robotů lze stanovit hlavní požadavky na provozní vlastnosti mobilních servisních robotů s kolovým podvozkem:

- relativně nízká vlastní hmotnost robotu a malý specifický tlak na podložku (tato vlastnost je ovlivněna povrchem terénu, počtem, typem a rozměry kol),
- relativně vysoká užitná nosnost,
- malé obrysové rozměry robotu (délka, šířka, výška, rozvor a rozchod kol),
- dobrá manévrovatelnost v operačním a pracovním prostoru (ovlivněno rozvorem, rozchodem kol, poloměrem zatáčení, typem řízení, ...),
- dobrá brodivost a průchodnost robotu (bezpečné překonání překážek)
- provozní jednoduchost, operační jednoduchost a spolehlivost, energetická nezávislost, ... [1]

#### Rozdělení kolového robotu z hlediska uspořádání kol

Z výše uvedených požadavků je možné analyzovat zejména kritické provozní a jízdní situace z pohledu fyzikálních a mechanických závislostí spojených s pohybem, stabilitou a interakcí podvozku s podložkou. K docílení statické stability robotu je potřeba minimálně tři opěrných bodů s povrchem terénu.

Poloha podvozku vůči podložce a směr pohybu robotu ovlivňuje míru stability. Rozměry a uspořádání náprav musí být navrženy tak, aby průsečík tíhové výslednice sil, které působí na kolový robot při jeho provozu, se trvale pohybovala v oblasti opěrné plochy podvozku. Tato plocha je vymezena kontaktními body podvozku s terénem. Řešení zaručí požadovaný stupeň stability. Kolové MSR lze tedy z pohledu přístupu k řešení jejich podvozku a vyvolaných pohybových a provozních vlastností kategorizovat do skupin: [1], [2]

##### a) Nestabilní koncepce

**Jednokolová a dvoukolová koncepce** – uspořádání kol je paralelní nebo sériové a jedná se o řešení s funkčně minimálním počtem kol. Takto sestavený mobilní robot je staticky nestabilní a dynamicky stabilní. Směr pohybu robotu je realizován změnou otáček jednoho z kol nebo naklopení u jednokolového provedení. Při pohybu musí být řešena dynamická stabilita.

##### b) Stabilní koncepce

**Tříkolová koncepce** – z pohledu statické stability se jedná o minimální počet kol. Uspořádání náprav je dvounápravové – na jedné nápravě jsou dvě kola, třetí kolo obvykle

zajišťuje statickou stabilitu podvozku. Řízení směru pohybu je většinou realizováno změnou otáček jednoho kola vůči druhému.

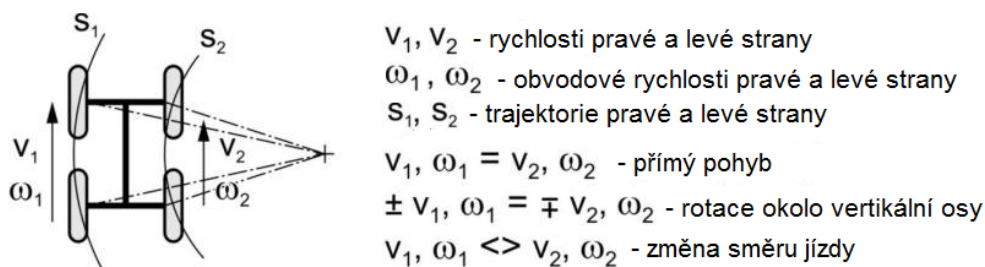
**Čtyřkolová koncepce** – Dvounápravové uspořádání vychází z konstrukce mobilní dopravní techniky. Většinou je funkce podvozku rozdělena na hnací a hnanou nápravu, kde k řízení pohybu dochází z pravidla natáčením směrových kol. Koncepce vytváří větší opěrnou plochu a tím i větší stupeň stability.

**Šesti a vícekolová koncepce** – většinou koncepce využívá nezávislého zavěšení kol se samotnými pohony. Řešení zajišťuje průchodnost podvozku ve značně členitém terénu. Směr pohybu je většinou řešen natáčením směrových kol. [1]

#### Způsoby řízení kolového podvozku

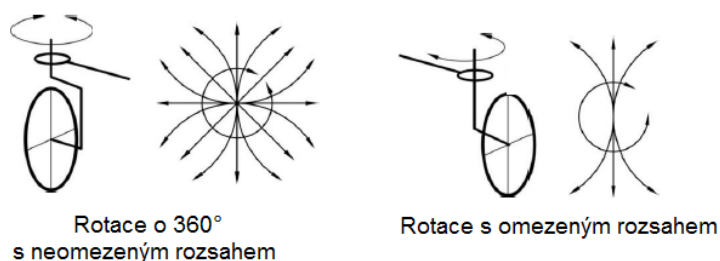
Mezi nejpočetnější skupinu kolových robotů patří výše zmíněné tří a čtyřkolové koncepce, u kterých podvozek umožňuje naprogramovat libovolnou trajektorii pohybu v konstrukčně daném rozsahu, která je realizována pomocí kola, převodového ústrojí apod. Samotné natáčení kol a realizace pohybu po trajektorii je možné několika způsoby: [1]

- Diferenčním řízením – změna směru pohybu je provedena rozdílem otáček kol na jednotlivých stranách podvozku. Rozdíl otáček ovlivňuje poloměr zatačení podvozku. Konstrukce tohoto principu musí být vzhledem k silovému zatížení při zatačení robustní. Schéma diferenčního řízení je uvedeno níže na obrázku č. 4. [2]



Obr. 4) Koncepce diferenčního řízení natáčení podvozku [2]

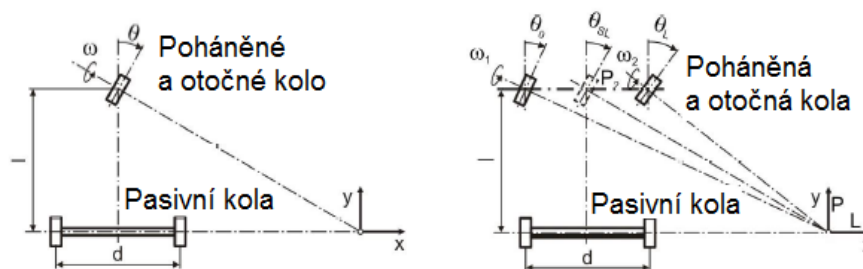
- Natáčením směrových kol – změna směru je konstrukčně řešena přímo natočením kol okolo své vertikální osy. V případě využití tohoto principu na všech kolech podvozku umožňuje vysokou manévrovatelnost ve všech směrech pohybu. Koncepce natáčení může být řešena buď s omezeným rozsahem rotace nebo s neomezeným úhlem rotace okolo vertikální osy kol. Konstrukce otočných kol je možné vidět na obrázku č. 5.[2]



Obr. 5) Koncepce přímého natáčení směrových kol [2]

- Kombinací použití diferenčního řízení a otočných kol vzniká tzv. Ackermannův způsob řízení, které se využívá zejména u tříkolových a čtyřkolových robotů. Ve většině

případů je jedna náprava hnací a druhá směrová. Poháněná náprava musí být vybavena buď mechanickým nebo elektrickým diferenciálem. Existuje také varianta čtyřkolového robotu se všemi otočnými koly, tzv. duální Ackermannovo řízení. Schéma Ackermannova řízení pro čtyřkolový a tříkolový podvozek viz obrázek č. 6.[Kolibal], [Smrček]



Obr. 6) Schéma Ackermannova řízení [2]

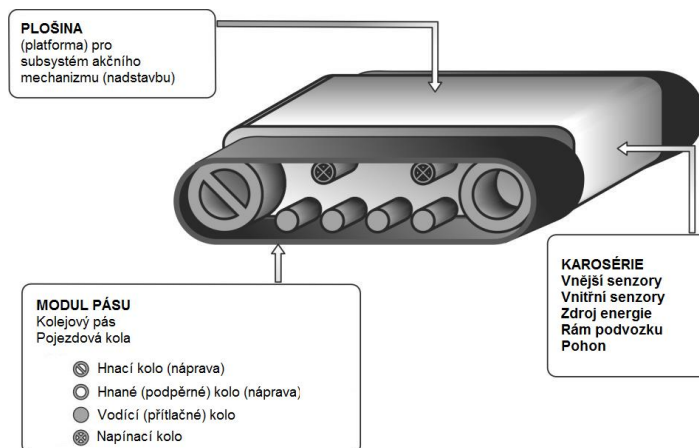
#### 2.1.4 Servisní roboty s pásovým podvozkem

Princip a konstrukce lokomočního ústrojí pro pohyb v prostoru vychází z aplikace technického modelu pásu a řízeného pásového podvozku. Systém umožňuje pohyb po vodorovné i šikmé ploše ve směru závislém na geometrii podvozku. Konkrétní řešení podvozku se liší dle rozdílnosti použití od jednoduchých variant se dvěma pásy až po speciální pásové případně kombinované kolo-pásové soustavy. Skupina robotů s pásovým podvozkem je vesměs využívána v náročných operačních prostředích, kde se aplikuje pro speciální servisní úlohy – jedná se např. o oblasti vojenství, policie, bezpečnostních složek. Mobilní zařízení s pásy je řízeno smykem (diferenční řízení) a může se pohybovat po různě členitém terénu, kde mohou mít roboty jiných koncepcí při překonávání terénních překážek problémy.

Délka pásů a jejich rozvor má přímý vliv na manévrovací schopnosti pásového podvozku. Řízení v autonomním režimu je u pásového podvozku málo přesné, proto se používá spíše kombinace ovládání teleoperátorem. Konstrukce samotných pásů vychází z poznatků získaných při konstrukci pásové dopravní a vojenské techniky. Jejich výhodou je aplikace na tvrdém i polotvrdém povrchu. Se speciálním provedením pásů je možná aplikace i na měkkých površích, avšak s rizikem zapadnutí. [1], [2]

Pásové MSR dosahují využitím své vlastní celkové hmotnosti vysokých tahových sil, což jim umožňuje efektivnější využití maximálního výkonu aplikovaného pohonného agregátu. Velká styková plocha kolejového pásu s podložkou garantuje nízký měrný tlak MSR na podložku a tím zlepšení tahových vlastností pásového MSR oproti kolovému MSR. Na obrázku č. 7 níže jsou zobrazeny dílčí subsystémy pásového podvozku. [1]





Obr. 7) Schéma systémového modelu subsystému mobility podvozku [2]

### Uspořádání a charakteristiky robotu s pásovým podvozkem

Stejně jako u kolového podvozku se při konstrukci využívají různá uspořádání hlavních funkčních podskupin (rám podvozku, modul pásu, počet modulů apod.), čímž vznikají z pohledu morfologie různé typy struktur pásových robotů. Liší se především počtem a uspořádáním modulů pásů. Varianty provedení se následně využívají při optimalizaci lokomoční jednotky pro konkrétní typ aplikace a určení trakčních a lokomočních vlastností. Mezi hlavní charakteristické konstrukční znaky uspořádání patří:

- počet modulů pásů a jejich uspořádání na podvozku,
- použitý typ modulu pásu (článekový, nedělený nekonečný pás),
- geometrický tvar a rozměrové vyjádření povrchu běhounové části pásu (hladký nebo hrubý dezén, geometrické varianty článků),
- uspořádání komponentů modulu pásu (hnací, hnané, vodící, napínací kolo, článek pásu, typ pásu), ...

Podobně jako u kolového robotu je nutné na základě aplikace pásového podvozku zohlednit při jeho konstrukci následující vlastnosti:

- nízká hlučnost,
- nízká hmotnost,
- délka robotu a délka kontaktu pásu s terénem,
- dovolená šířka podvozku,
- stálé napínání pásů,
- nosnost podvozku,
- způsob řízení robotu,
- odpružení kol podvozku,
- odolnost vůči vysokým teplotám, chemikáliím, radiaci, ... [1]

### Rozdělení pásových robotů z hlediska uspořádání pásů

Jak bylo již výše uvedeno, délka, rozvor, počet a zejména uspořádání pásů mají zásadní vliv na manévrovací schopnosti robotu. Jednotlivé nápravy s moduly pásů jsou uspořádané podle řešení hnacích kol. Nejpoužívanější sestavené struktury klasifikujeme jako:

**Dvoupásová koncepce** – konstrukce je sestavena z minimálního počtu pásů z hlediska statické stability, ale při pohybu je potřeba věnovat pozornost dynamické stabilitě. Moduly pásů jsou vůči sobě uloženy paralelně. Řízení je diferenční, jako u většiny pásových podvozků.

**Třípásová koncepce** – podvozek je konstruován jako trojstopý, což znamená, že třetí modul pásů je zabudován paralelně mezi dvěma hlavními pásy. Třetí pás slouží jako podpora při překonávání složitých překážek a napomáhá udržovat stabilitu robotu ve složitém terénu. Řízení je buď diferenční nebo se využívá řízený pohyb zmíněného třetího pásu.

**Čtyřpásová koncepce** – dvě dvojice pásů mohou být uspořádány paralelně (tzv. čtyřstopý podvozek) nebo sériově (tzv. dvojstopý podvozek). K řízení je využíván buď diferenční způsob nebo řízený pohyb výkyvných modulů pásů vzhledem k rámu podvozku. [1], [2]

#### Řízení pásového podvozku

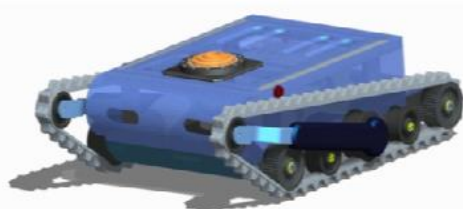
Jízda pásového robotu po libovolné trajektorii je nejčastěji realizována na principu diferenčního řízení. Tento způsob změny směru je pro autonomní MSR obvykle nepřesný. Z toho důvodu se pásový robot ovládá přímo operátorem. Stejně jako u kolového robotu je rychlost pravé a levé strany podvozku při jízdě v přímém směru shodná, zatímco při zatáčení se rychlosti jednotlivých stran liší. Schéma velikostí jednotlivých rychlostí při diferenčním řízení viz obrázek. [2]

## 2.2 Výběr konstrukcí mobilních robotů s kolovými nebo pásovými podvozky

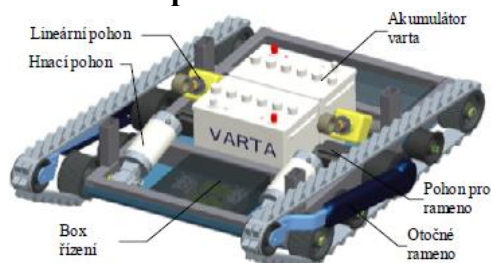
Obecně nelze říci, které konkrétní provedení mobilního podvozku robotu je neoptimálnější pro zdolávání překážek, schodů nebo jízdu v terénu. V současnosti existuje spousta konstrukčních provedení robotů určených ke zdolávání nerovností povrchu a bariér zabráňujících plynulou trajektorii jízdy.

Vzhledem k zadání diplomové práce je v této kapitole provedena rešerše konkrétních konstrukcí a variant mobilních pásových a kolových robotů. Rešerše je zaměřena zejména na roboty sestavené v rámci univerzitního nebo jiného laboratorního výzkumu ve spojení s technickými instituty a univerzitami. Cílem je navrhnout universální koncepci robotu, která je vhodná pro monitorovací nebo servisní úlohy a ke zdolávání překážek nebo schodů. Proto jsou v kapitole uvedeny podobné designové koncepce, které s danou problematikou souvisí. Na základě získaných informací jsou jednotlivá zařízení a zkonstruované koncepce popsány a jejich principy jsou vysvětleny.

### 2.2.1 Modulární pásový podvozek s proměnlivou kinematikou pásu



Obr. 8) Pásový robot v rámci diplomového projektu VŠB Ostrava [3]



Obr. 9) Odhalení vnitřních částí robotu [3]

Na obrázku č. 8 je zobrazen pásový robot, který je po stranách poháněn přes pryžové pásy hnacími koly. Konstrukce podvozku se skládá ze dvou hlavních celků – hlavní rám a horní modulární rám. Stavba robotu je provedena z tenkostěnných svařených profilů. Po celé své délce jsou postranní pásy podepřeny čtyřmi podpůrnými koly, z toho jedno je na pohyblivém rameni využívané pro změnu kinematiky pásů. Rozsah otáčení ramene je 240°. Jak je patrné z obrázku č. 8, kinematiku pásů je možné vhodně měnit při nájezdu na nerovnosti nebo jiné schodovité překážky. Vhodně upravená kinematika pásu podvozku napomáhá zdolávat různé překážky. Horní část rámu umožňuje pomocí univerzální připojovací příruby modulárně připojit externí nástavby. Rotační příruba je pomocí lineárního kuličkového pohonu vyvažována v jednom směru. Toto vyrovnávání připojeného nákladu je užitečné zejména při pohybu po nakloněné rovině nebo schodech tak, aby byl náklad vždy ve vodorovné poloze.

Robot je sestaven k pohybu v náročném terénu. Podvozek je zakrytý, aby odolal vnějšímu znečištění, vniknutí prachu a vody. Mezi výhody se dá považovat vyhovující napínání pásu včetně dostatečné stability podvozku a nadzvednutí pomocným ramenem ve spodní části podvozku v případě uvíznutí na překážce. Nevýhodou je naopak možnost pohybu jízdy vpřed pouze v jednom směru vlivem omezeného vyvažování nákladu. Náhled do vnitřního prostoru robotu je možné vidět na obrázku č. 9. [3]

Základní parametry:

Hmotnost – 128,2 kg

Rozměry (délka x šířka x výška) – 1090x746x318 (mm)

Max. rychlost – 3 km/hod

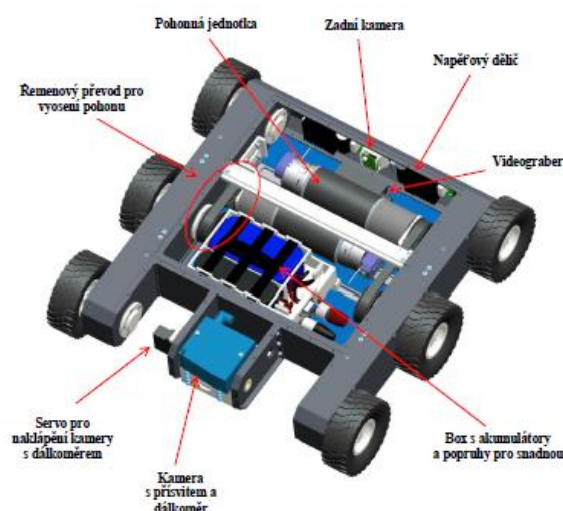
Nosnost – 50 kg

Výška maximální překážky – 250 mm

Max. úhel stoupání nakloněné roviny – 30°

Výdrž na jedno nabití – 1 hodina [3]

## 2.2.2 Mobilní kolový robot pro monitoring



Obr. 10) Kolový robot z VŠB Ostrava určený pro monitoring v terénu [4]

Na obrázku č. 10 je šestikolové provedení mobilního robotu, jehož konstrukce je sestavena za účelem monitorování ve vnějším prostředí, s čímž je spojen pohyb po středně náročném terénu. Motory robotu jsou umístěny v prostřední části nosného rámu podvozku. Pohyb vpřed a vzad je realizován pohonem prostředních kol na pravé i levé straně přes spojku a řemenový převod. Nosná část rámu je tvořena jednotlivými bloky, které jsou spolu se vzpěrami částečně sešroubovány, slepeny nebo svařeny. Součástí podvozku jsou profily nesoucí akumulátory a profily pro uchycení vnějšího krytování. Vzájemné umístění pohonů a akumulátorů je řešeno tak, aby nežádoucí vzniklé teplo od pohonů zbytečně nezatěžovalo baterie. Řízení a externí kontrola robotu je provedena pomocí Wi-Fi routeru umístěného v rámu podvozku. Přístup k akumulátorům je proveden z horní strany robotu, což umožňuje jejich snadnou a rychlou výměnu. [4]

Základní parametry:

Hmotnost – 22,6 kg

Rozměry (délka x šířka x výška) – 510x456x90 (mm)

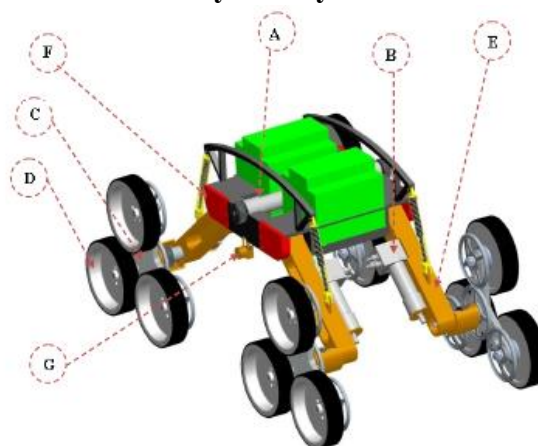
Rozvor a rozchod kol – 421, 515 (mm)

Maximální rychlost – 10 km/hod

Nosnost – 10 kg

Max. úhel stoupání nakloněné roviny – 25°  
 Výdrž na jedno nabití – 1 hodina [4]

### 2.2.3 Čtyřkolový robot s Weinsteinovými koly



Obr. 11) Podvozek s Weinsteinovými koly [5]

Podvozek s Weinsteinovými koly viz obrázek č. 11 slouží speciálně pro zdolávání členitých překážek a pohyb po schodech. Kola jsou vzájemně uspořádána do rovnostranného trojúhelníku, přičemž všechna tři kola jsou poháněna jedinou hnací hřídelí umístěnou v pomyslném středu trojúhelníku přes ozubená kola. Na obrázku č. 12 je uvedena varianta se šesti motory. Dva motory (A) pohání pomocí řemene (D) kola robotu a umožňují tak pohyb vpřed a vzad. Hlavní pohony (A) pohánějí přes řemen výstupní hřídel s řemenicí společně s navazujícím hnacím ozubeným kolem. Jeden motor obstarává pohyb dvou soukolí na téže straně. Čtyři zbylé motory (B) slouží k rotaci samotných Weinsteinových kol tzv. hvězdic (C). Konstrukce robotu je tvořena odpruženými rameny (E) usazenými na čepech v těle robotu, jednotlivé profily jsou z lehké slitiny hliníku. Z důvodu jedinečnosti a složitosti provedení se jedná o drahou variantu konstrukce podvozku mobilního robotu. [5]

Základní parametry:

Hmotnost – 91 kg

Rozměry (délka x šířka x výška) – 1152x695x568 (mm)

Maximální rychlost – 1,44 km/hod

Výška maximální překážky – 175 mm

Max. úhel stoupání nakloněné roviny – 30°

Odhadovaná doba výdrže baterie – 4 hod [5]

### 2.2.4 Hybridní pásový mobilní robot

Jedná se o konstrukci pásového robotu, který díky své hybridní struktuře a výklopnému rameni velmi dobře překonává různé varianty reálných překážek. Malá celková výška podvozku v případě zasunutého výklopného ramene umožňuje podjetí překážky či bariéry. Případné zábrany v cestě je možné také odstranit z cesty pomocí výklopného ramene a to do hmotnosti až 61 kg v závislosti na délce vyložení ramene. Na základě provedených testů uveze robot dvě dospělé osoby o hmotnosti 187 kg. Konečné provedení designu umožňuje robotu několik všestranných úkonů – jízdu do a ze schodů, překonávání vysokých válcových zátaras, zdolávání příkopů a schodovitých překážek. Výklopné rameno je vybaveno koncovým efektem, který umožňuje uchopení jednotlivých předmětů. Díky symetrické geometrii

nezpůsobí robotu problémy ani převrácení pásy vzhůru o 180°. Zařízení je vybaveno Li-Ion baterií pro zajištění nezávislého zdroje energie. Robot je opatřen předními a zadními LED světly, kamerami ke snímání okolního prostředí pro usnadnění práce teleoperátora. Základní konfigurace robotu je znázorněna na obrázku, jednotlivé modifikace výsuvného ramene a pohyb po schodech viz obrázek č. 12. [6]



Obr. 12) Využití jednotlivých uspořádání robotu při jízdě po schodech [6]

Základní parametry:

Hmotnost – 65 kg

Rozměry (délka x šířka x výška) – 814x626x179 (mm)

Délka robotu při maximálním vyložení ramene – 2034 mm

Maximální rychlost – 1 m/s

Maximální výška překážky – 0,75 m

Maximální délka příkopy – 0,7 m

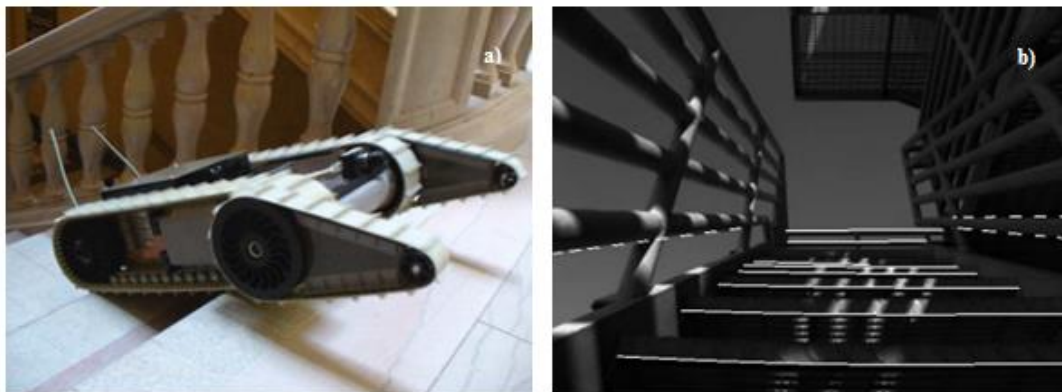
Maximální průměr válcové překážky – 0,6 m [6]

### 2.2.5 Autonomní pásové schodolezy

Na universitě v Minnesotě byl sestaven pásový robot využitelný v reálných podmínkách s automatickým rozpoznáváním geometrie schodů. Dvoupásový robot je vybaven vnitřními moduly pro řízení směru a centrování pro zaručení bezpečné, rychlé a přesné jízdy po schodech. K vyhodnocení aktuálních hodnot rychlosti je použit tříosý gyroskop. Na podvozku je připevněna kamera, která snímá jednotlivé hrany schodů. Konstrukce a pohled z perspektivy robotu je znázorněn na obrázku č. 13. Robot je v přední části vybaven otočnými rameny s pásy, které usnadňují najíždění zejména na první schod. Obě ramena zaujímají rovnoběžnou polohu s hlavními pásy a schody, jakmile začne robot stoupat po schodech vzhůru. Vlastní konstrukce umožňuje robotu stoupat po schodech v max. rozsahu sklonu 25- 30°. [7]



Stejně jako na Technické Universitě v Minnesotě byla sestavena v rámci Technického Institutu v Kalifornii konstrukce robotu v podobném duchu, tzv. vysokorychlostní autonomní pásový schodolez. Zařízení slouží pro průzkumné a záchranné mise v budovách a městech. Mezi jeho potřebné dovednosti patří jízda po schodech. Na základě získaných informací ze zabudovaných senzorů a vyhodnocení pomocí řídicího systému je schopen autonomní jízdy ve vysoké přesnosti a rychlosti, to vše vzhledem k efektivitě práce a minimalizaci vzniklých chyb. Robot má celkem 3 stupně volnosti – dva nezávislé pohyby hlavních pásů na pravé a levé straně včetně pásů na pomocných ramenech a pohyb otočného čepu, který umožňuje natáčení ramen na přední části robotu viz obrázek č. 14. [8]



Obr. 13) Autonomní pásový schodolez a jeho perspektiva při jízdě do schodů [7]



Obr. 14) Autonomní pásový schodolez s proměnou kinematikou pásů [8]

### 2.2.6 Autonomní šplhací robot s taktilními koly

Tento terénní kolový robot s taktilními dotykovými koly je schopen přizpůsobit svou jízdu na základě získaných informací z taktilních senzorů umístěných v kolech podvozku. Základní princip taktilních kol spočívá v detekování a lokalizování fyzického kontaktu kola s překážkou. Po obvodu čepů jednotlivých kol je připevněno 16 infračervených senzorů, které měří deformaci pneumatiky vlivem vnějšího zatížení. Získaná data umožňují robotu pracovat v autonomním režimu. Speciální nosná konstrukce robotu s celkovými patnácti stupni volnosti umožňuje zařízení zaujmout různých uspořádání částí podvozku a tím zdolávat náročný terén. Konstrukce robotu je tvořena dvěma nosnými těly po obou stranách, které jsou propojeny hlavní válcovou trubicí umožňující vzájemné natočení. Každé z postranních těl robotu je připojeno pomocí poháněného paralelogramu na 2 končetiny s navazujícími motorizovanými klouby, přes které jsou připojena tzv. předloktí se dvěma koly. Složitá a propracovaná

konstrukce robotu je znázorněna na obrázku č. 15 níže, kde lze vidět, jak je robot schopen pomocí různého natočení svých konstrukčních částí přejíždět členité překážky. [9]

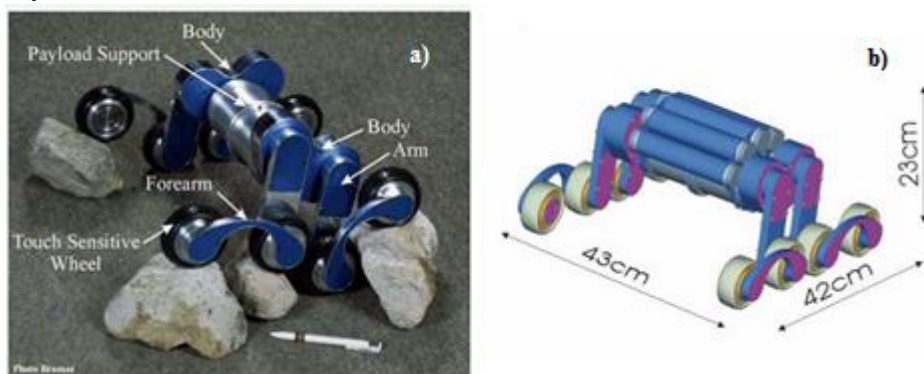
Základní parametry:

Hmotnost – 10 kg

Rozměry (délka x šířka x výška) – 420x430x230 (mm)

Nosnost – 5 kg

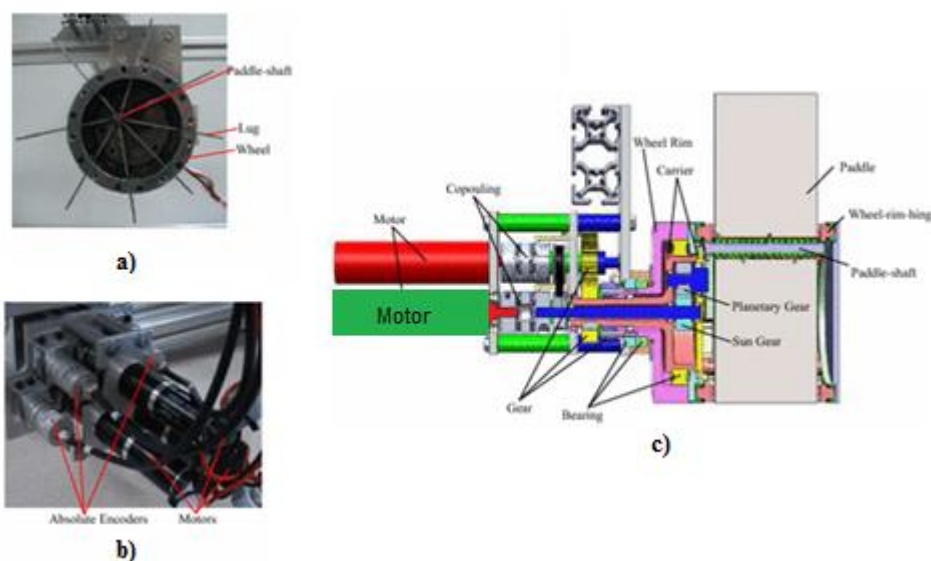
Maximální rychlost – 2 m/s [9]



Obr. 15) Detailní popis a vnější rozměry robota s taktilními koly [9]

### 2.2.7 Mobilní kolový robot s excentrickými pádly na kolech

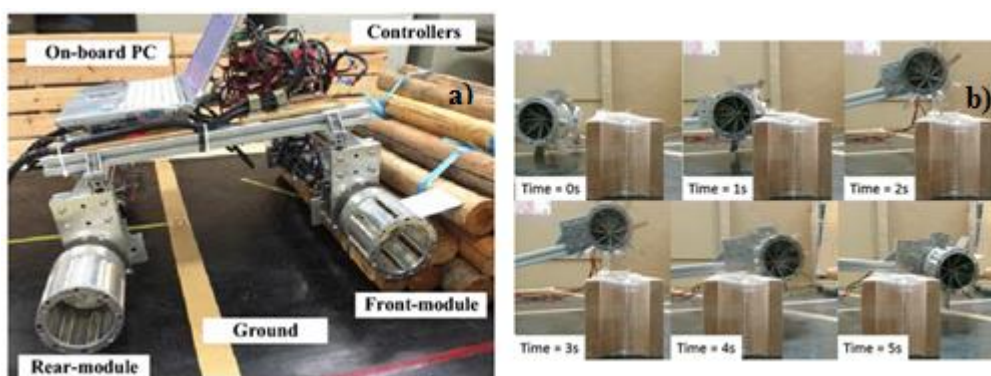
Princip robotu je založen na tradičním kolovém podvozku, avšak ke zlepšení schopnosti zdolávat členitý terén a pohybovat se přes překážky má v kolech zabudován excentrický lopatkový mechanismus. Polohu středového čepu lopatek je možné aktivně měnit vůči poloze středového čepu kola, čímž dochází k rozdílnému vysunutí lopatek v radiálním směru po obvodu kola robotu. Funkce excentrického mechanismu umístěného v kole je znázorněna níže na obrázku č. 16. Motivací užití tohoto principu mobility je aplikace robotu v oblastech postižených vlnou tsunami. V takové situaci je potřeba kombinace pohybu v nepřístupném terénu a plavby po vodní hladině. Na základě provedených experimentů bylo prokázáno, že robot veškeré zmíněné činnosti s přehledem ovládá. [10]





Obr. 16) Excentrický mechanismus vysouvání lopatek [10]

Jednotlivá kola jsou tvořena dutou válcovou skořápkou – viz obrázek č. 16-a, vnitřní čep kola je poháněn pomocí motoru – viz zelený motor na obrázku č. 16-c. Osa hlavního pohonu kola je excentricky uložena vůči ose otočného čepu kola, kroučící moment je přenášen přes dvojici ozubení s přímými zuby. Lopatky jsou připevněny uvnitř válcové skořápkky kola a mohou pasivně rotovat okolo čepu lopatek, který je přes planetovou převodovku poháněn třemi vlastními stejnosměrnými motory – viz obrázek 16-b. Aktuální polohy motorů jsou odečítány z absolutních enkodérů. Všechny 8 lopatek je uloženo ve vedeních, která umožňují klouzavý pohyb v radiálním směru. Z aplikace robotu vyplývá nutnost ochrany vůči znečištění a vnějším vlivům, tzn. konstrukce je vyrobena z nerezové oceli a z hliníkových slitin. Části pohybových mechanismů jsou utěsněny vůči vniknutí zrn písku a jiných nečistot. [PaddleWheel] Na obrázku č. 17 je znázorněna celá konstrukce robotu a jeho jízda přes schodovité překážky. [10]



Obr. 17) Zdolávání členitých a schodovitých překážek [10]

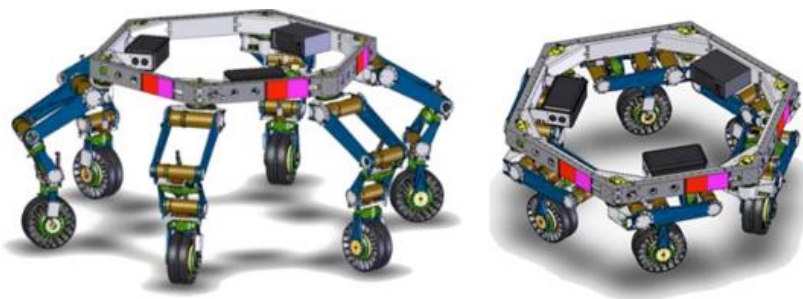
### 2.2.8 Athlete: Měsíční krácející kolový robot

Jedná se o speciální vesmírný kolový robot, který kombinuje vlastnosti krácejících robotů s podvozkem s kolovým principem. Athlete byl navrhnut společně organizacemi NASA Johnson vesmírným centrem, NASA Ames výzkumným centrem, Stanfordskou univerzitou a společností Boeing. Athlete je sestaven zejména pro vesmírné mise a pohyb např. na Měsíci. Umožňuje jízdu v členitém terénu a v prudkých svazích. Ke zdolávání náročných překážek využívá Athlete končetiny s koly tak, že překážky může např. překročit, zatímco kola používá pro odvalování po hladších a rovnějších površích. Výhodou této koncepce je kombinace vysoké mobility krácejících robotů a zároveň energetické účinnosti kolových robotů. Další plusem je možnost odepnutí libovolné končetiny rychlo-odepínacím / rychloupínacím mechanismem a nahrazením manipulátorem s koncovým efektozem pro uchopení předmětů. Athlete je vybaven sérií kamer umístěných v různých směrech, které umožňují teleoperátorovi bezproblémovou vzdálenou kontrolu nad jízdou robotu. Všechny kamery jsou připevněny na nosnou konstrukci ve tvaru rovnoměrného šestihranu. Celá koncepce robotu je řešena modulárně tak, aby bylo možné např. připojit více takových robotů dohromady pro převoz velkého nákladu nebo pro připojení konstrukce do dokovací nabíjecí stanice.

Všechny končetiny robotu jsou totožné, mají 6 stupňů volnosti a umožňují tak různé konfigurace – viz. obrázek výše. Jednotlivé klouby pohánějí stejnosměrné bez kartáčové motory Maxon o výkonu 120 W. Kroučící moment motoru je z převodován v poměru až 13000:1 přes harmonickou převodovku. Tak velký převodový poměr umožňuje obrovskou hodnotu kroučícího momentu (až 1476 Nm v naklápěcím kolenním kloubu), na druhou stranu limitní jsou výstupní otáčky – cca 1 otáčka za minutu. Otočné klouby jsou z převodovány přes

planetové převodovky v menším poměru – cca 3600:1, což obnáší zvýšenou hodnotu výstupních otáček - 3,5 za minutu při nižších hodnotách kroutícího momentu. Pro snímání polohy natočení motoru jsou použity inkrementální enkodéry, které musí být zreferovány v případě, že řídicí systém ztratí hodnotu aktuální polohy natočení pohonu. Z toho důvodu jsou na výstupech z kloubů umístěny absolutní rotační čidla. Díky přesnému odečítání polohy natočení je možné měnit hodnotu výstupního kroutícího momentu a výstupní síly vzhledem k vnějšímu zatížení na robotu, zejména při stoupání do prudkých svahů.

Pro odvalování na tvrdém povrchu robot využívá kola značky Michelin. Jejich pohon je obstarán servomotory, které přes planetové převodovky zajistí výstupní kroutící moment až 423 Nm. Bezdušová kola s obdobnými vlastnostmi jako mají běžné pneumatiky jsou díky flexibilním výztužím po obvodu schopna absorbovat a tlumit vnější zatížení a zároveň nehrozí defekt. [11]



Obr. 18) Vesmírný robot Athlete a jeho uspořádání [11]

Základní parametry:

Hmotnost – 850 kg

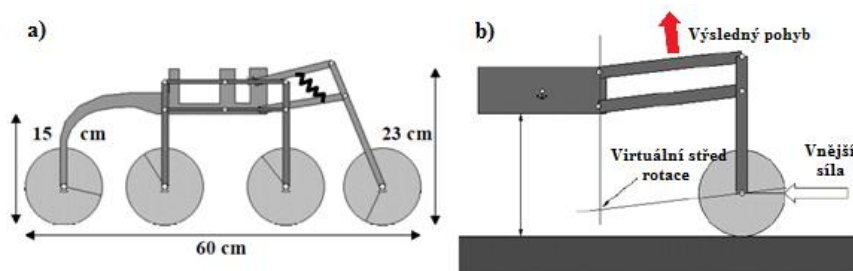
Průměr kružnice opsané vnějším rozměrem robotu – 2,5 m

Výkon motoru pro pohon kol – 1,4 kW

Max. rychlost – 10 km/hod [11]

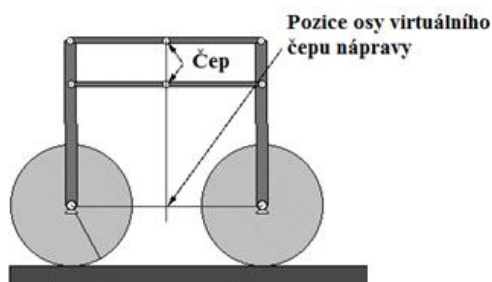
### 2.2.9 Vesmírný robot s rozšířenými lezeckými schopnostmi

Jedná se o inovativní šestikolový robot, dvě kola pro řízení směru jsou umístěna vpředu a vzadu, po stranách má robot dva páry dalších kol pro zajištění boční stability. Přední řídicí kolo je zavěšeno na pružině, která zaručuje neustálý kontakt s povrchem terénu. Díky svým schopnostem dosahuje robot vysoké manévrovatelnosti, zejména možnosti otočení se na místě s minimálním prokluzem, jízdu po schodech a přes různé druhy překážek. [12]



Obr. 19) Uspořádání vesmírného robotu se znázorněnou funkcí pohybu pdovozku [12]

Základní princip a mechanická stavba robotu je znázorněna výše na obrázku č. 19. Vidlice předního řídicího kola je tvořena paralelogramem a plní dvě hlavní funkce. První z činností obstarává přítlačná pružina, která garantuje optimální kontakt s povrchem terénu. Druhá funkce je znázorněna v pravé polovině obrázku, kdy vlivem vnější zatěžující síly např. při najetí do překážky, dojde k rotaci okolo virtuálního středu otáčení daného mechanismu, čímž se celá přední vidlice nadzvedne ve směru červené šipky. Kombinací těchto schopností získává robot skvělé vlastnosti jízdy, jak po rovném povrchu, tak i při zdolávání terénních překážek. [12]



Obr. 20) Pozice otočného čepu paralelní nápravy [12]

Klíčem ke správné funkci podvozku jsou nápravy postranních kol, jejichž konstrukce je tvořena paralelogramy. Na nepřizpůsobivém terénu zajišťují robotu boční stabilitu, a díky výšce, ve které jsou čepy osy symetrie nápravy umístěny, je robot schopen zdolávat vysoké překážky v terénu. Na rozdíl od klasické nápravy, která je výškově vůči terénu uložena nízko a hrozilo by uvíznutí na nějaké nerovnosti, má právě paralelně umístěná náprava výhodu viz obrázek č. 20. Jednotlivá kola jsou poháněna motory o výkonu 1,75 W. Jejich rychlost je možné vzdáleně bezdrátově ovládat pomocí infračerveného rozhraní. [12]

Základní parametry:

Hmotnost – 3,1 kg

Rozměry (délka x šířka x výška) – 600x-x230 (mm)

Výška zdolatelné překážky – 20 cm

Výkon motoru pro pohon kol –1,75 W [12]

### 3 KONSTRUKCE VLASTNÍHO NÁVRHU MOBILNÍHO ROBOTU

Na základě zadání diplomové práce, vyhodnocení rešerše a konzultace s vedoucím práce je níže sestaven požadavkový list se vstupními nároky na konstrukci robotického podvozku.

#### 3.1 Požadavkový list robotu a specifikace zadání

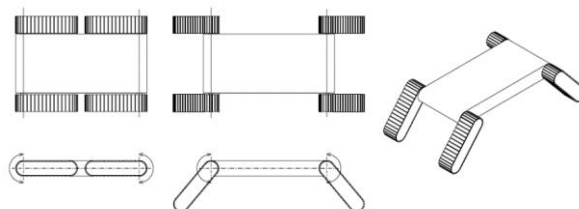
- Průjezdnost robotu dveřmi o šířce nejméně 600 mm
- Schopnost překonat překážku o maximální výšce 30 mm
- Maximální sklon nakloněné roviny max. 15°
- Schopnost jízdy po zpevněném povrchu
- Vnitřní použití, laboratorní prostředí – částečná odolnost vůči prachu a vlhkosti (stupeň krytí IP23)
- Nízká vlastní hmotnost robotu
- Maximální rychlost robotu 3,6 km/hod, zrychlení 0,25 m/s<sup>2</sup>
- Maximální nosnost robotu 25 kg
- Možnost univerzálního připevnění externího nákladu
- Možnost přestavení nástavby s nákladem v závislosti na najetí na nakloněnou rovinu/schody
- Schopnost jízdy vpřed a vzad
- Univerzální symetričnost robotu v případě otočení o 180° (kolama vzhůru)
- Konstrukční řešení umožňující samovyproštění robotu v případě uvíznutí na překážce
- Nízké náklady na případnou vlastní výrobu robotu
- Robot s vlastním zdrojem elektrické energie s dostatečnou kapacitou k provozu cca 1 hodiny
- Bezpečnostní prvky pro pohyb v laboratořích

#### 3.2 Návrh variant řešení robotu

##### 3.2.1 Varianta A

Pásová koncepce Varianty A robotu je tvořena 4 samostatnými otočnými rameny s gumovými pásy, které zajišťují robotu vhodné jízdní vlastnosti. Všechna čtyři ramena jsou samostatně poháněna elektromotory, čímž je zajištěna dostatečná síla při jízdě po rovině, nakloněné rovině nebo přes překážky. Jednotlivá ramena s pásy jsou otočná o 360° okolo osy hnacího kola gumového pásu, což podvozku umožňuje zaujmout různé konfigurace vlastní stavby.

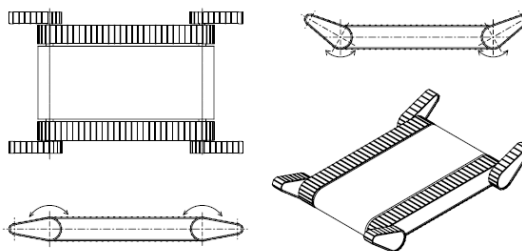
Univerzální stavba a její následné modifikace umožní robotu zdolávat různé překážky, najetí na nakloněnou rovinu či schody, podjetí překážek apod. Varianta A je navržena jako oboustranná a symetrická pro případ otočení okolo vodorovné roviny symetrie robotu. Samostatné ovládání jednotlivých ramen s pásy také umožní samovyproštění v případě uvíznutí na překážce bez nutnosti přidání dalších vyprošťovacích mechanismů. Vnitřní zástavba nosné konstrukce varianty A zaujímá vzhledem k celkovým rozměrům robotu velký prostor, což nabízí dostatečné místo pro uložení vlastního zdroje energie, pohonů, senzorů a veškerých dalších periférií robotu. Uspořádání podvozku viz obrázek č. 21 níže.



Obr. 21) Schématický obrázek čtyřpásového robotu varianty A

### 3.2.2 Varianta B

Varianta B viz č. 22 nabízí čtyřstopý pásový podvozek, který robotu zajišťuje dostatečnou stabilitu a zvýšenou nosnost. Dva postranní pásy obstarávají hlavní tažnou sílu robotu při jízdě vpřed nebo vzad. Po obou stranách jsou pásy doplněny čtyřmi pomocnými rameny s gumovými pásy, které jsou taktéž poháněné. Svou funkcí napomáhají pohybu podvozku zejména při přejíždění překážek. Výhodou je rotace těchto pásů o  $360^\circ$ , které umožňují podvozku vhodně využít vlastní kinematiku pásů např. při najíždění na schodovité překážky. Podobně jako u varianty A je robot díky vlastní stavbě schopen samovyproštění bez použití dalších pomocných mechanismů. Vzhled robotu je symetrický a umožňuje tak dopřednou či zpětnou jízdu, stejně tak možné otočení celého robotu okolo vodorovné roviny symetrie podvozku v případech převrácení o  $180^\circ$ . Koncepce podvozku je navržena v malé výšce v případě nutnosti podjetí předmětů/překážek zabráňujících další jízdu. Oproti variantě A má robot nepatrně menší vnitřní prostor krytování nosné konstrukce, vzhledem k limitu celkové šířky podvozku. Důsledkem může být případný nedostatek úložného prostoru pro vlastní zdroj energie a jiné potřebné části robotu.

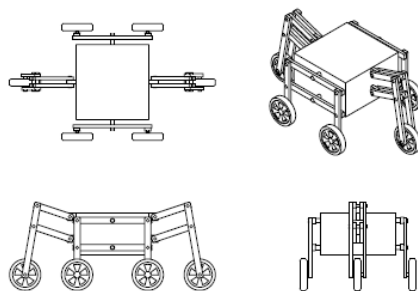


Obr. 22) Schématický obrázek čtyřstopého pásového robotu varianty B

### 3.2.3 Varianta C

Princip lokomoce varianty uvedené na č. 23 je založen na mobilním podvozku se šesti koly. Pohybový mechanismus je tvořen dvěma postranními paralelogramy se čtyřmi koly a dvěma opěrnými rameny se dvěma koly na přední a zadní části robotu. Postranní páry kol a jejich paralelogramy jsou uloženy na otočných čepích, což jim umožňuje natáčení okolo osy čepu v případě najetí na nerovnost či nakloněnou rovinu. Přední a zadní přitlačná ramena jsou taktéž

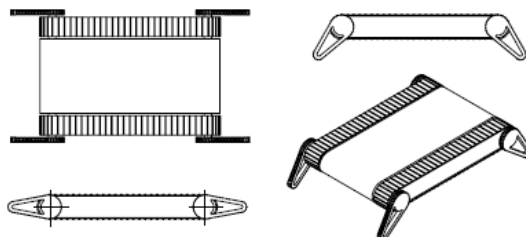
tvořena paralelogramy, která umožňují zdolání výškových překážek v trajektorii robotu. Neustálý přítlak předního a zadního kola k povrchu je proveden pomocí přitlačné pružiny. Přední a zadní kola s rameny zároveň slouží jako opěra v případě jízdy po nakloněné rovině či vyjíždění na překážku. Podvozek je navržen jako symetrický, tzn. zdolávání nerovností při jízdě vpřed tak i vzad. Nevýhodou podvozku varianty C jsou menší délkové zástavbové rozměry vlastní nosné konstrukce pro uložení krytování, vlastního zdroje energie apod. vzhledem k celkové délce robotu. Jedná se o složitější variantu z hlediska pohonu a natáčení jednotlivých kol, což může vést k vyšším vlastním cenovým nákladům. U kolového robotu je v případě zdolávání nerovností limitem samotná výška překážky vzhledem k průměru kola a světlé výšce podvozku. Takto koncipovanou variantu nelze navrhnout jako oboustrannou v případě převrácení robotu okolo vodorovné osy o  $180^\circ$ . Nevýhodou může být také snížená nosnost vzhledem k tuhosti podvozku a přitlačné pružině předního a zadního kola. Kladnou vlastností je naopak nízká energetická náročnost zařízení vzhledem k použití kolového podvozku.



Obr. 23) Schématický obrázek šestikolového robota varianty C

### 3.2.4 Varianta D

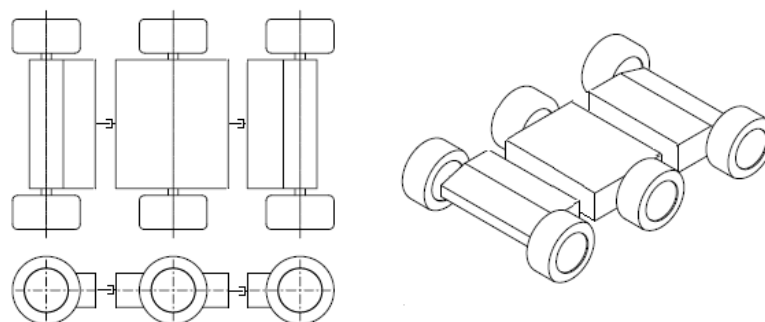
Jedná se o podobné provedení pásového podvozku jako u variant A a B. Jde o zjednodušenou verzi dvoupásového podvozku. Pro zlepšení lokomočních vlastností robotu, je po obou stranách vybaven otočnými tuhými rameny. Jednotlivá ramena mají podvozku napomáhat při zdolávání nerovností, překážek, při najíždění na nakloněnou rovinu či schody. Varianta C je vybavena pohony, které pohánějí dva hlavní pásy po stranách a zároveň umožňují natočení manipulačních ramen o  $360^\circ$ . Tuhá ramena mohou být potažena gumou nebo jiným drsným materiálem pro zlepšení tření a zajištění relativního pohybu robotu vůči zdolávané překážce. Výhodou je, že ramena zásadně nezvětšují vnější rozměry podvozku a při jejich libovolném natočení zaujímá robot konfiguraci dvoustopého pásového vozidla. Zároveň se jedná o levnější provedení variant A a B při částečně snížené schopnosti zdolávat terénní nerovnosti. Celý podvozek je navržen jako symetrický pro jízdu vpřed i vzad a schopnost pokračovat v jízdě v případě otočení o  $180^\circ$  kolem své vodorovné osy.



Obr. 24) Schématický obrázek pásového robotu s otočnými rameny varianty

### 3.2.5 Varianta E

Varianta E se šestikolovým článkovým podvozkem zaručuje dobrou stabilitu a vhodné jízdní vlastnosti. Nosná konstrukce a tělo robotu se skládá ze tří článků, které jsou vzájemně mezi sebou propojeny kloubovým spojem. Kloubové spojení jednotlivých náprav s koly umožňuje lepší zdolávání terénních překážek a nabízí dobré lokomoční vlastnosti na nerovném povrchu. Pro překonání vysokých překážek musí být podvozek vybaven koly s dostatečně velkým průměrem a případným přidavným mechanismem umožňující najetí na překážku nebo samo vyproštění v případě uvíznutí. Celý podvozek je navržen jako oboustranný v případě převrácení o 180° okolo vodorovné osy. Nepříjemnou komplikací dané koncepce může být rozdělení vnitřního prostoru podvozku, který tvoří prostor pro umístění vlastního zdroje energie a pohonů. Rozčlenění do tří oddělených celků zmenší celkový vnitřní prostor robotu a také může způsobit komplikace pro rozvody elektrické kabeláže či jiné energie. Nevýhodou může být také zmenšená nosná plocha pro umístění nákladu. V případě umístění nákladu o rozměrech stejných či podobných celému půdorysu podvozku je nutno vzít v potaz, že se robot bude chovat jako jeden spojitý celek – tuhý podvozek se šesti koly. Výhodou naopak může být nízká energetická náročnost zařízení a cena, protože není potřeba pohánět všechny nápravy.



Obr. 25) Schématický obrázek kolového článkového robotu varianty E

## 3.3 Metoda multikriteriálního hodnocení

Jedná se o systematickou a racionální metodu selekce konkrétního řešení, projektu, výrobku či obecně technického objektu, kdy autor stojí před otázkou, jakou variantu zvolit. Díky multikriteriální metodě hodnocení lze paralelně srovnat několik variant řešení a na základě vstupních požadavků vybrat tu správnou. Cílem celého hodnocení je souhrnně vyjádřit technicko-ekonomickou (dále jen TE) úroveň jednotlivých variant návrhů a určit pořadí jejich výhodnosti. Porovnat konkrétní řešení a jejich TE úroveň je obtížné, protože jednotlivé projekty jsou popsány soustavou TE parametrů o různých jednotkách a nastává tak problém přímé nesčitelnosti. Tuto obtíž je nutno řešit různými způsoby agregace těchto hodnot tak, aby bylo možné vyjádřit TE úroveň jedinou hodnotou. Právě k tomuto účelu existuje několik postupů souhrnně označovaných jako metody multikriteriálního hodnocení. [16], [17], [18]

### Bazická bodovací metoda

Pro porovnání navržených variant mobilního podvozku je zvolena metoda bazické funkce. Hodnocená hlediska u jednotlivých řešení jsou vyčíslitelná, což zjednodušuje proces

hodnocení. Použitím bazické bodovací metody se porovnává hodnocená varianta se vzorovým řešením – vzorovým etalonem – bází.

Hodnocení konkrétní varianty probíhá jak po stránce technické (označení  $\tau$ ), tak i po ekonomické (označení  $\xi$ ). Technická i ekonomická hodnota varianty se posléze umísťuje do roviny hodnotícího diagramu ( $\xi = f(\tau)$ ), kde je její výhodnost patrná ze vztahu k jiným, rovněž zaneseným variantám. [16], [17], [18]

Stručnou podstatu metody a postup při aplikaci lze uvést v následujících bodech:

- nejprve se provede reprezentativní výběr parametrů (vlastností). Je třeba vyloučit vzájemně závislé parametry. Jejich počet by měl být omezen na podstatné a spolehlivě zjistitelné.
- stanoví se bodovací stupnice, která hodnotí buď kvalitativní nebo kvantitativní hodnoty parametrů.
- určí se významnost (váha) parametrů.
- provede se hodnocení [16], [17], [18]

#### Technická hodnota $\tau$

- A) Při identifikaci varianty se hodí celá řada faktorů, parametrů a vlastností, které označíme jako  $T_1, T_2, \dots, T_n$ , tj.  $T (1 \dots n)$
- kde:  $n$  = maximální počet faktorů, parametrů, vlastností –  $n$  = obvykle (1-100)

B) Hodnotu každého faktoru, parametru a technické vlastnosti vyjádříme pomocí třídníku  $t_1, t_2, \dots, t_j$  se stanovenou (zvolenou) stupnicí, tj.:  $t (1 \dots j)$

    - kde:  $t_1$  = maximální hodnota faktoru, parametru, vlastnosti

Doporučený rozsah stupnice třídníku:  $t (1, 5)$  nebo  $t (1, 10)$  atd. I když je hodnocení faktorů subjektivní, je podloženo objektivně zjistitelnými parametry a vlastnostmi.

- C) Hodnocený faktor, parametr, vlastnost lze vyjádřit i procentuálně:

$$p_\tau = \frac{100}{t_j} [\%] \quad (1)$$

- D) Relativní technická hodnota  $n$ -tého faktoru, parametru, vlastnosti je pak:

$$T_n * t_j \quad (2)$$

- E) Význam (váhu) jednotlivých faktorů, parametrů, vlastností dle důležitosti rozlišíme koeficienty  $g_n (\leq 1)$ , tedy:

$$0 \leq g_n \leq 1 \quad (3)$$

- F) Technický stav hodnocené varianty dle různých hledisek je:

$$(\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_j, \dots, \tau_n) = (g_1 * t_1, g_2 * t_2, \dots, g_j * t_j, \dots, g_n * t_n) \quad (4)$$

- G) Konečná technická hodnota varianty je vyjádřena:

$$\tau = \frac{\sum_{j=1}^n (g_j * t_j)}{\sum_{j=1}^n g_j * t_{max}} = \frac{g_1 * t_1 + g_2 * t_2 + \dots + g_n * t_n}{(g_1 + g_2 + \dots + g_n) * t_j} \leq 1 \quad (5)$$

- kde:  $g_j$  = koeficient rozlišující významnost hodnocených faktorů, parametrů, vlastností



- $t_j$  = hodnota  $i$ -tého faktoru, parametru, vlastnosti
- $n$  = počet hodnocených faktorů, parametrů, vlastností
- V procentuálním vyjádření:  $\tau \leq 100 \%$ . [16], [17], [18]

### 3.4 Výběr konstrukční varianty

Na základě zadání diplomové práce a stanovených požadavků na výslednou konstrukci robotu jsou níže v tabulce č. 2 stanoveny posuzované vlastnosti napříč jednotlivými variantami a jejich vysvětlení.

Tab 2) Tabulka posuzovaných vlastností jednotlivých variant

n	Vlastnost	Označení	Poznámka
1	Ekonomičnost	T1	Celkové náklady vlastní konstrukce
2	Jednoduchost	T2	Poměr jednoduchosti konstrukce k možnostem jejího využití při funkci podvozku.
3	Nosnost	T3	Maximální hmotnost nákladu.
4	Lokomoční schopnosti	T4	Schopnost robotu zdolávat překážky.
5	Rozměry konstrukce	T5	Využitelnost upínací plochy podvozku vzhledem k celkovým rozměrům podvozku.
6	Univerzálnost	T6	Schopnost změny kinematiky a vnější stavby
7	Samovyprošťovací schopnost	T7	Využití vlastních pohonných mechanismů k samovyproštění při uvíznutí na překážce.
8	Energetická náročnost	T8	Spotřeba energie robotu.

Níže v uvedené tabulce č. 3 jsou určeny hodnoty  $t_j$ :  $t$  (1...8) pro všechny navrhované varianty napříč porovnávaným vlastnostem  $T_n$ : ( $T$  (1...8)). Koncepce A–E jsou zhodnoceny z hlediska vstupních požadavků na finální podobu zařízení. Konkrétní hodnoty faktorů jsou stanoveny dle níže uvedené stupnice:

- $t_1=0$ = nevyhovující
- $t_1=1$ = velmi slabé
- $t_1=2$ = vyhovující
- $t_1=3$ = dobré
- $t_1=4$ = velmi dobré
- $t_1=5$ = výborné

S ohledem na zadání a vlastní úsudek jsou dále v tabulce č. 3 určeny významy/váhy  $g_n$  jednotlivých faktorů pro všechny varianty. Stanovené velikosti významů spadají do intervalu  $0 \leq g_n \leq 1$ , kde:

- $g_n$  blížící se 0 odpovídá malému významu, tzn. na konkrétní hodnotu posuzované vlastnosti zařízení není kladen velký důraz
- $g_n$  blížící se 1 odpovídá velkému významu, tzn. na konkrétní hodnotu posuzované vlastnosti zařízení je kladen velký důraz

Tab 3) Hodnoty faktorů a význam vah u jednotlivých variant

	Vlastnost	Označení	Hodnota jednotlivých faktorů u dílčích variant $t_1, t_2 \dots, t_j$					Význam (váha) jednotlivých faktorů u všech variant $g_n$
			Var. A	Var. B	Var. C	Var. D	Var. E	
1	Ekonomičnost	T1	3	2	3	3	3	0,5
2	Jednoduchost	T2	3	2	2	5	3	0,7
3	Nosnost	T3	4	5	2	4	3	0,5
4	Lokomoční schopnosti	T4	5	5	3	3	3	0,8
5	Rozměry konstrukce	T5	3	3	2	3	4	0,3
6	Univerzálnost	T6	5	5	2	4	2	0,9
7	Samovyprošťovací schopnost	T7	5	4	2	3	2	0,6
8	Energetická náročnost	T8	2	1	5	2	5	0,2

Tab 4) Hodnoty faktorů a význam vah u jednotlivých variant

Varianta	Technická hodnota
A	0,561
B	0,521
C	0,305
D	0,480
E	0,346

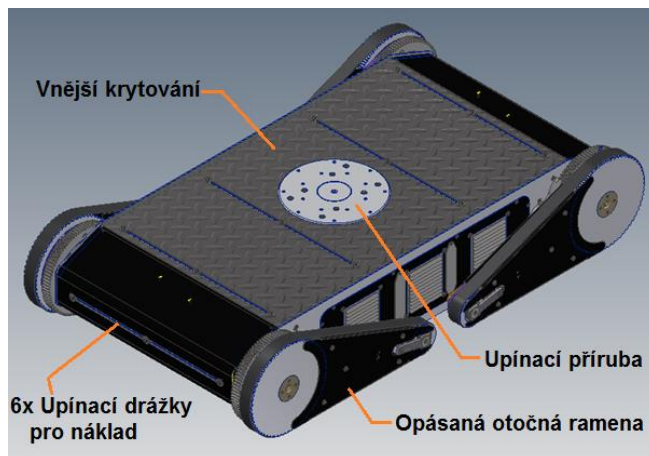
Pro všechny navržené koncepce jsou na základě výše uvedených vztahů (1) až (5) vypočteny konečné technické hodnoty, které z kvantitativního hlediska hodnotí parametry jednotlivých variant – viz výsledné technické hodnoty v tabulce č. 4. Detailní výpočet pomocí rovnic (1) až (5) je uveden v příloze č. 3

Při srovnání výsledných technických hodnot návrhů konstrukce je z tabulky č. 4 zřejmé, že nejlépe splňuje vstupní požadavky varianta A, a to konkrétně z 56 %. Navrhované řešení B je s nepatrně nižším výsledkem na druhém místě. Obě varianty jsou si svou konstrukcí velmi blízké, avšak varianta A má v porovnání s druhým návrhem nepatrně jednodušší konstrukci.

S ohledem na konzultaci s vedoucím diplomové práce a výsledky technických hodnot jednotlivých variant je pro další práci zvolena varianta A. Konstrukční návrh a detaily jednotlivých mechanických celků je blíže popsán a rozebrán v kapitole 5.

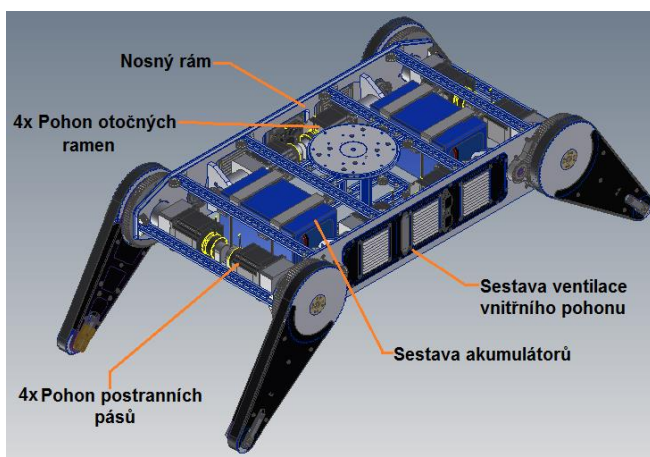
## 4 ROZBOR VYBRANÉ VARIANTY

### 4.1 Čtyřpásový mobilní podvozek



Obr. 26) Vnější stavba čtyřpásového podvozku

Navržený čtyřpásový robot s otočnými rameny je díky možné změně své kinematiky schopen zdolávat schodovité či jiné překážky. Konstrukční řešení je koncipováno tak, aby bylo možné daný podvozek využít pro jízdu po rovině, mírně nakloněné rovině nebo schodišti. Mechanická část zařízení je navržena pro eventuální výrobu jednoho prototypu v prostorách školních dílen. Předpokládané využití podvozku spočívá ve vnitřních prostorech, ale s ohledem na jeho vnější krytování je možná aplikace také ve vnějším prostředí. Mobilní vlastnosti podvozku a šířka postranních pásů umožňuje jízdu po tvrdém nebo alespoň zpevněném povrchu. Tvar podvozku je navrhnout jako symetrický, aby bylo možné jej bez problému použít pro jízdu vpřed i vzad. Díky symetričnosti umožňuje robot jízdu koly vzhůru v případě přetočení okolo vodorovné roviny symetrie.



Obr. 27) Hlavní celky pásového podvozku

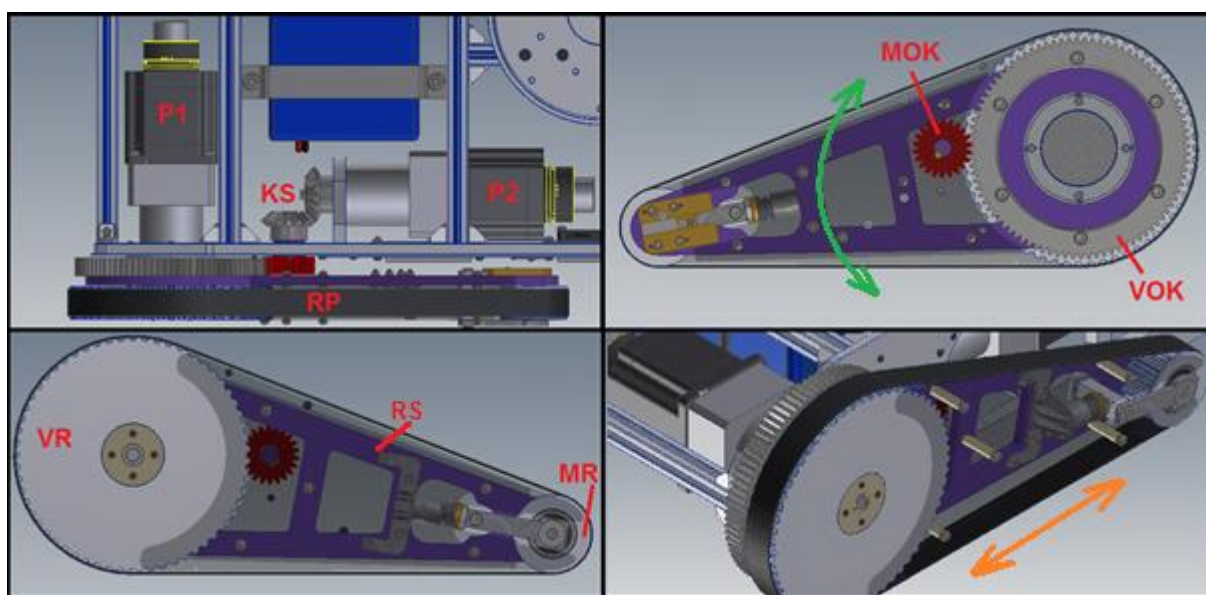
Mobilní robot je po stranách vybaven čtyřmi otočnými rameny s pásy, které zlepšují jeho mobilitu a schopnost zdolávat překážky. Lze předpokládat, že zkonstruovaný robotický podvozek lze uplatnit pro laboratorní, monitorovací, servisní a jiné univerzální úlohy. Mobilní podvozek je navržen jako dálkově ovládaný, jeho pohyby jsou kontrolovány pomocí teleoperátora a dálkového ovládání. Operátor může podvozek pozorovat přímo nebo vzdáleně

prostřednictvím kamer, které lze na nosnou konstrukci přimontovat. Platforma podvozku je vybavena rotační upínací přírubou a upínacími drážkami nosných profilů, na které lze připevnit externí náklad o hmotnosti až 25 kg. Díky této funkci je možné rozšířit pole působnosti pásového podvozku, kdy k horní přírubě je možné přišroubovat např. manipulátor nebo jiné periferie potřebné k servisním úlohám. Vnější rozměry podvozku jsou navrženy tak, aby bylo možné projet dveřmi většími než 600 mm. Výsledná výška robotu je proměnlivá v závislosti na natočení ramen. V základní modifikaci má podvozek výšku 195 mm. Jednotlivé dílčí celky robotu je možné vidět na obrázcích č. 26 a 27, jejichž popis a detaily jsou uvedeny v kapitole 5.2.

## 4.2 Popis jednotlivých částí konstrukčního řešení

### 4.2.1 Mechanismus realizace pohybů pásového robotu

Hlavní funkcí zkonstruovaného pásového robotu je mobilita. Díky pohybovým mechanismům je robot schopen vykonávat dva pracovní pohyby. První pracovní pohyb je samotná jízda robotu vpřed a vzad, která je realizována pomocí 4 ramen s oboustranně ozubenými řemeny (směr pohybu je níže na obrázku č. 28 znázorněn oranžovou šipkou). Druhý vedlejší pracovní pohyb umožňuje otáčení celé sestavy ramene okolo osy ozubeného věnce (směr pohybu je níže na obrázku č. 28 znázorněn zelenou šipkou). Detailní pohled na pohybový mechanismus je zobrazen níže na obrázku.



Obr. 28) Mechanismus pohybů pásového podvozku

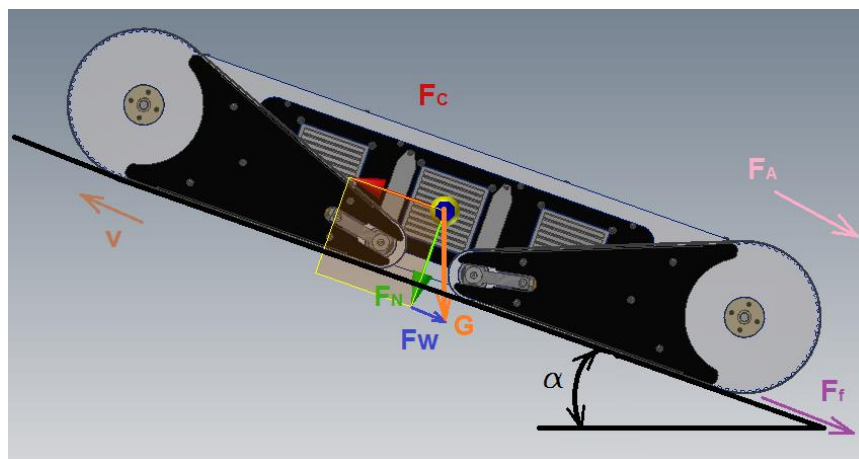
Jak je vidět výše pracovní pohyby jsou realizovány díky pohonům P1 a P2. Obě pohonné jednotky se skládají z rotačního čidla, brzdy, motoru a převodovky. Pohonná jednotka P1 roztáčí velkou řemenici VR, která přes své vnější ozubení přenáší kroutící moment na ozubený řemen RP a dochází tak k otáčení malé řemenice MR. Díky kontaktu ozubeného řemene s podložkou je podvozek schopen jízdy vpřed nebo vzad. Kolmo na pohon P1 je uložena pohonná jednotka P2, ta přenáší kroutící moment přes kužlové soukolí KS [30] na hřídel a na ní uložený ozubený pastorek s přímými zuby MOK. Zuby pastorku zapadají do

velkého ozubeného věnce VOK, který je pevně přišroubován k výpalku ramene RS. Díky tomuto pohybu dokáže podvozek otáčet s celou sestavou postranních pásů a vhodně tak měnit svou kinematiku, kterou lze uplatnit zejména při najíždění na překážky a jízdu po schodech.

#### 4.2.2 Návrh pohonu

Navržený mobilní robot pro své pohyby využívá celkem osm pohonů, které potřebuje nejen pro svou jízdu, ale také pro vhodnou změnu vlastní kinematiky. K určení konkrétního typu motoru je níže v kapitole sestaven předběžný výpočet. Pohon jízdy vpřed a vzad je dimenzován z hlediska výkonostních nároků při rozjezdu robotu na nakloněné rovině pod úhlem  $\alpha$ . Motor potřebný ke změně kinematiky – k otáčení postranních opásaných ramen, je navržen vzhledem k momentovým nárokům potřebným ke zvednutí celé váhy podvozku. Níže uvedený výpočet a použité vztahy jsou sestaveny na základě literatury [2], [14]. Parametry potřebné pro výpočet jsou buď zvoleny nebo vycházejí ze zadání diplomové práce.

##### Hlavní pohon pásů



Obr. 29) Rozbor sil působících na podvozek při jízdě na nakloněné rovině

##### Potřebné parametry pro předběžný výpočet pohonu pásového robotu:

Rychlost po nakloněné rovině  $v = 1 \text{ m/s}$

Hmotnost pásového robotu  $m = 130 \text{ kg}$

Zrychlení  $a = 0,25 \text{ m/s}^2$

Převodový poměr pásového pohonu  $i_R = 3$

Poloměr poháněného kola  $r_k = 0,095 \text{ m}$

Úhel nakloněné roviny  $\alpha = 15^\circ$

Tíhové zrychlení  $g = 9,81 \text{ m/s}^2$

Trakční součinitel tření  $\mu = 0,3$

Celkový moment setrvačnosti sestavy pohonu  $J_{poh} = 1,05 \cdot 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$

Mom. setrvačnosti velké řemenice

$J_{VR} = 7,99 \cdot 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$

Mom. setrvačnosti malé řemenice

$J_{MR} = 8,26 \cdot 10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$

Výpočet potřebných hodnot a parametrů pohonu robotu je uveden v rovnicích (6) až (20).

Celková potřebná síla pro pohyb robotu po nakloněné rovině:

$$F_C = F_f + F_W + F_a + F_s [\text{N}] \quad (6)$$

Síla třecích odporů:

$$F_f = \mu \cdot G \cdot \cos \alpha = m \cdot g \cdot \cos \alpha [\text{N}] \quad (7)$$

Síla potřebná k překonání výškového rozdílu:

$$F_W = G \cdot \sin \alpha = m \cdot g \cdot \sin \alpha [\text{N}] \quad (8)$$

Odpor způsobený setrvačností posuvných hmot:

$$F_a = m \cdot a [\text{N}] \quad (9)$$

Odpor způsobený setrvačností rotujících hmot:

$$F_s = \frac{1}{r_k} \cdot J_C^E [\text{N}] \quad (10)$$

Celkový moment setrvačnosti vztážený na osu hřídele motoru:

- Pozn. hodnoty momentů setrvačnosti dílů pohybového mechanismu jsou vzaty z katalogu výrobce pohonu, moment setrvačnosti velké a malé řemenice je vypočítán z 3D modelu součástí. Moment setrvačnosti malé řemenice je navýšen o 20 % vzhledem k tomu, že do výpočtu celkového momentu setrvačnosti není zahrnut moment setrvačnosti řemene a ložisek.

$$J_C = J_{poh} + J_{VR} + \frac{1,2 \cdot J_{MR}}{i_R^2} [\text{kg} \cdot \text{m}^2] \quad (11)$$

Dosazením do vztahu (6) vypočteme celkový moment setrvačnosti:

$$J_C = 1,05 \cdot 10^{-4} + 7,99 \cdot 10^{-3} + \frac{1,2 \cdot 8,26 \cdot 10^{-5}}{3^2} = 8,1 \cdot 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \quad (12)$$

Úhlové zrychlení:

$$\varepsilon = \frac{a}{r_k} = \frac{0,25}{0,095} = 2,63 \text{ rad/s}^2 \quad (13)$$

Potom:

$$F_C = m \cdot g \cdot \cos \alpha + m \cdot g \cdot \sin \alpha + m \cdot a + \frac{1}{r_k} \cdot J_C^E [\text{N}] \quad (14)$$

Po úpravě:

$$F_C = m \cdot g \cdot (\mu \cdot \cos \alpha + \sin \alpha + \frac{a}{g}) + \frac{1}{r_k} \cdot J_C^E [\text{N}] \quad (15)$$

Dosazením do vztahu (15) získáme výslednou sílu:

$$F_C = 130 \cdot 9,81 \cdot (0,3 \cdot \cos 15 + \sin 15 + \frac{0,25}{9,81}) + \frac{1}{0,095} \cdot (8,1 \cdot 10^{-3})^{2,63} [\text{N}]$$

$$F_C = 732,13 \text{ N}$$

Předběžný celkový výkon motoru:

$$P_m = F_C \cdot v [\text{W}] \quad (16)$$

Dosazením do vztahu (16):

$$P_m = 732,13 \cdot 1 = 732,13 \text{ W}$$

Do výpočtu předběžně potřebného výkonu pohonu nejsou zahrnuty účinnosti jednotlivých částí mechanismu např. motoru, převodovky. Proto navrhují tento výkon navýšit bezpečnostním koeficientem  $K_1=1,3$ .

Upravený celkový potřebný výkon má pak podobu:

$$P_{mc} = P_m \cdot K_1 = 732,13 \cdot 1,3 = 951,8 \text{ W} \quad (17)$$

Z toho důvodu, že jsou pro pohon použity celkem 4 motory se celkový potřebný výkon rozdělí na:

$$P_{mc1} = P_{mc} \cdot \frac{1}{4} = 951,8 \cdot \frac{1}{4} = 237,95 \text{ W} \quad (18)$$

Požadovaný moment poháněné velké řemenice:

$$M_{k1} = \frac{P_{mc1} \cdot r_k}{v} = \frac{237,95 \cdot 0,095}{1} = 22,6 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (19)$$

Požadované otáčky na výstupu z převodovky motoru:

$$n_1 = \frac{v}{2 \cdot \pi \cdot r_k} \cdot 60 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 0,095} \cdot 60 = 100,52 \text{ min}^{-1} \quad (20)$$

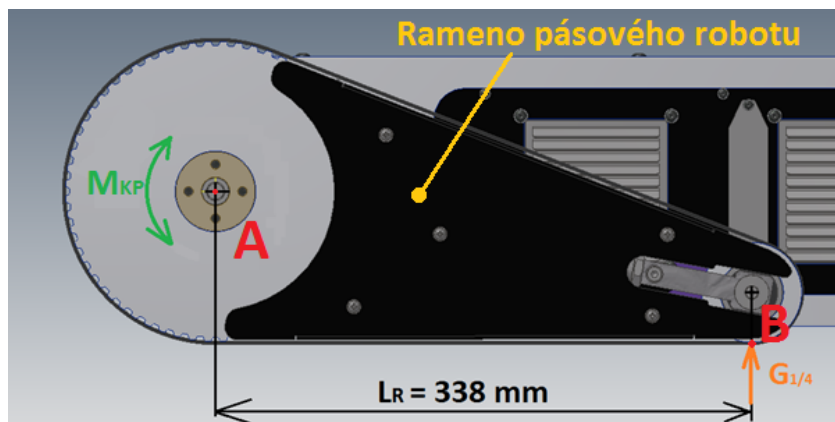
Na základě výpočtů jsou stanoveny potřebné parametry pro výběr pohonu pásového robotu:

$$P_{mc1} = 237,95 \text{ W}$$

$$M_{k1} = 22,6 \text{ N} \cdot \text{m}$$

$$n_1 = 100,52 \text{ min}^{-1}$$

Vedlejší pohon otočných ramen



Obr. 30) Rozbor sil působících na otočné rameno podvozku

Pro určení výkonu motoru pro otáčení ramene okolo středu v bodě A viz obrázek č. 30, je sestaven výpočet s ohledem na silové nároky na otáčivý pohyb ramene pásu. Mobilní robot se v momentě začátku otáčení ramene dotýká podložky v bodě B (v místo styku pásu a podložky) a velikost reakční síly v tomto bodě se rovná  $\frac{1}{4}$  tíhové síly robotu. Výpočet je proveden pouze pro jedno rameno, avšak situace je totožná pro všechna 4 ramena. Potřebné rovnice jsou uvedeny ve vztazích (21) až (23).

Dané parametry a hodnoty pro předběžný výpočet pohonu otočného ramene:

Reakce podložky na rameno robotu  $G_{1/4} = 318,8 \text{ N}$

Velikost ramene momentu  $L_R = 338 \text{ mm} = 0,338 \text{ m}$

Převodový poměr ozubeného pastorku a ozubeného věnce  $i_{OK} = 1/4$

Rychlost ozubeného pastorku  $v_2 = 0,175 \text{ m/s}$

Poloměr ozubeného pastorku  $r_{k2} = 22 \text{ mm} = 0,022 \text{ m}$

Tíhové zrychlení  $g = 9,81 \text{ m/s}^2$

Kroutící moment potřebný k otočení ramene okolo bodu A:

$$M_{KP} = G_{1/4} \cdot L_R [\text{N.m}] \quad (16)$$

Po dosazení do vztahu (16) dostaneme:

$$M_{KP} = 318,83 \cdot 0,338 = 107,76 \text{ N} \cdot \text{m}$$

Vypočtená hodnota  $M_{KP}$  představuje kroutící moment potřebný k otočení celého postranního ramene s pásem a překonání reakční složky působící od podložky. Použít přímo pohon, který by nabízel takto velký kroutící moment je s ohledem na rozměry a cenu nevhodné. Hodnota kroutícího momentu je proto zpřevodována pomocí ozubeného převodu mezi pastorkem a ozubeným věncem otočeného ramene, které jsou blíže popsány v kapitole a na 5.2.1 obrázku č. 28.

Zredukovaný kroutící moment na hřídel pastorku:

$$M_{K2} = 107,76 \cdot \frac{1}{4} = 26,94 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (21)$$

Potřebný výkon motoru:

$$P_{m2} = \frac{M_{K2} \cdot v_2}{r_{k2}} = \frac{26,94 \cdot 0,175}{0,022} = 214,3 \text{ W} \quad (22)$$

Výstupní otáčky:

$$n_2 = \frac{v}{2 \cdot \pi \cdot r_k} \cdot 60 = \frac{0,175}{2 \cdot \pi \cdot 0,022} \cdot 60 = 75,96 \text{ min}^{-1} \quad (23)$$

Na základě předběžného výpočtu jsou stanoveny potřebné parametry pro výběr pohonu otočného ramene robotu:

$$P_{m2} = 214,3 \text{ W}$$

$$M_{k1} = 26,94 \text{ N} \cdot \text{m}$$

$$n_1 = 74,96 \text{ min}^{-1}$$

#### 4.2.3 Výběr pohonů a dílčích komponent

Mezi nejběžněji používané typy pohonů mobilních robotů patří stejnosměrné motory s permanentními magnety nebo motory krokové. Výhodou stejnosměrného motoru je zejména poměr výkon/hmotnost a snadné řízení otáček. Naopak mezi nevýhody patří složitější a dražší polohové řízení v porovnání s motory krokovými. Stejnosměrné motory jsou vzhledem k vysokým otáčkám a nízkým výstupním momentům vhodně kombinovány s převodovkami. Krokové motory mají značné zastoupení na trhu, což má za následek nízkou cenu a výběr z širokého spektra parametrů těchto pohonů. [14]

Při pohledu na vypočítané předběžné parametry, které musí splňovat pohony pro jízdu robotu vpřed a vzad a zároveň pro otáčení jednotlivých ramen podvozku, je patrné, že hodnoty výkonů a momentů jsou si velmi blízké. Po uvážení a konzultaci s vedoucím mé diplomové práce je dále použit pouze jeden typ motoru, což vede k zjednodušení konstrukce a ke snížení



nákladů. Při výrobě jednoho prototypu robotu může být taková úspora zanedbatelná, avšak v případě výroby více kusů mobilního robotu lze předpokládat, že ušetřené náklady vzrostou. Pohonné jednotky pro jízdu robotu vpřed a vzad a pro otáčení jednotlivých ramen se liší pouze jiným typem zvolené planetové převodovky.

Na základě vstupních požadavků byla provedena rozsáhlá rešerše v oblasti výrobců stejnosměrných a krokových pohonů. Byl nalezen takový motor, který má vhodné své výkonnostní a momentové charakteristiky, ale také rozměry, hmotnost, cenu a je možné jej vhodně kombinovat s dalšími modulárními komponenty. Pro konkrétní použití pohonů byly rozhodující také vnější rozměry vzhledem k omezeným vnitřním prostorům nosného rámu.

#### Použitý motor – Nanotec DB87S01-S

Jedná se o bezkartáčový stejnosměrný motor s permanentními magnety, který vzhledem ke své životnosti a rozměrům nabízí maximální výkon. Díky integrovanému čidlu je u něj pak možné snadno měnit otáčky a v kombinaci s externím čidlem se může svými vlastnostmi rovnat servomotorům. [19] Výkonnostní parametry zvoleného pohonu jsou uvedeny v tabulce č. 5.

Tab 5) Charakteristiky zvoleného pohonu Nanotec [19]

Motor Nanotec DB87S01-S	
Nominální výkon $P_{Nn}$	220 W
Nominální kroutící moment $M_N$	0,7 N.m
Nominální otáčky $n_{Nn}$	3000 min <sup>-1</sup>
Nominální napájecí napětí	48 V
Hmotnost	1,85 kg
Maximální kroutící moment $M_{MAX}$	2 N.m
Účinnosti motoru $\mu_M$	0,85

Společnost Nanotec nabízí vhodnou kombinaci svých pohonů s dalšími potřebnými komponenty. Na pohon DB87S01-S modulárně navazuje brzda, enkodér a převodovka.

Všechny pohony jsou vybaveny brzdou BWA-1,5-6,35. Jedná se o elektricky ovládanou pružinovou brzdu, která poskytuje dostatečný statický přídržný moment. Na zadní čelo brzdy je bez jakékoliv redukce připevněno externí čidlo řady WEDS5541-B06 k polohovému řízení. [19] Parametry brzdy jsou uvedeny níže v tabulce 6.

Tab 6) Vlastnosti zvolené brzdy [19]

Brzda BWA-1,5-6,35	
Statický přídržný moment	1,5 N.m
Hmotnost	0,3 kg
Nominální napětí	24 V

#### Planetová převodovka:

Ke zvýšení výstupního kroutícího momentu jsou oba typy pohonů vybaveny planetovou převodovkou řady GPLE60. Její výhodou jsou relativně malé zástavbové rozměry vzhledem k výkonnostním parametrům. Převodovky garantují provoz až 30 000 hodin bez servisního zásahu. [19] Parametry zvolených převodovek jsou uvedeny v tabulkách 7 a 8. Napojení

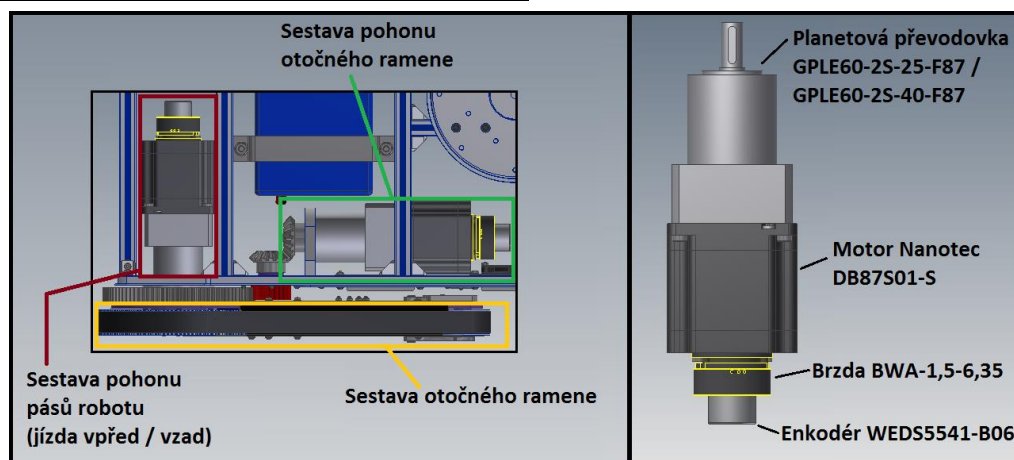
jednotlivých komponent a jejich umístění ve vnitřním prostoru čtyřpásového podvozku je znázorněno na obrázku č. 31.

Tab 7) Pohon jízdy robotu [19]

Převodovka GPLE60-2S-25-F87	
Nominální výstupní moment	40 N·m
Převodový poměr $i_{25}$	25
Hmotnost	1,1 kg
Účinnost převodovky $\mu_P$	0,95

Tab 8) Pohon otáčení ramene s pásy [19]

Převodovka GPLE60-2S-40-F87	
Nominální výstupní moment	44 N·m
Převodový poměr	40
Hmotnost	1,1 kg
Účinnost převodovky $\mu_P$	0,95



Obr. 31) Modulární systém pohonu

### Skutečné parametry motorů

#### Pohon pro jízdu robotu

Pro jízdu robotu vpřed nebo vzad je použit nepatrně slabší pohon, než bylo původně potřeba vybrat. Dojde tak ke snížení výsledných parametrů. Předběžný výpočet také nezahrnuje účinnosti motoru a převodovky, které výstupní parametry pohonu ovlivňuje. V rovnicích (24) až (31) jsou vypočítány skutečné výkonnostní hodnoty pohonných jednotek.

Celkový výkon poskytnutý pohony, pak je:

$$P_{Cn} = P_{Nn} \cdot \mu_M \cdot \mu_P = 220 \cdot 0,85 \cdot 0,95 = 177,7 \text{ W} \quad (24)$$

### Výstupní otáčky pohonu:

$$n_{Cn} = \frac{n_{Nn}}{i_{25}} = \frac{3000}{25} = 120 \text{ min}^{-1} \quad (25)$$

### Skutečná rychlost robotu:

$$v_{Cn1} = \frac{2 \cdot \pi \cdot r_k \cdot n_{Cn}}{60} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 0,095 \cdot 120}{60} = 1,19 \text{ m/s} \quad (26)$$

### Skutečný krouticí moment:

$$M_{k1} = \frac{P_{Cn} \cdot r_k}{v_{Cn}} = \frac{177,7 \cdot 0,095}{1,19} = 14,19 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (27)$$

Ačkoliv jsou výsledné parametry pohonu pro jízdu robotu nižší než původně vypočítané, jsou považovány jako vyhovující. Rozhodujícím faktorem jsou malé vnitřní zástavbové prostory robotu, které velmi omezují případné zvolení většího motoru. Volba silnějšího motoru má za následek zvětšení zástavbových prostor, zvýšení potřebné kapacity akumulátorů apod. Předpokládá se, že robot bude z většiny svého pracovního času jezdit po vodorovném povrchu. Po dosažení úhlu nakloněné roviny  $\alpha = 0^\circ$  do vztahu (9) je potřeba přibližně 451 W celkového výkonu k jízdě robotu. V takovém případě zvolené pohony bez problému splňují požadavky. Vybraný pohon umožňuje momentové přetížení až na 2 N·m v případě jízdy na nakloněné rovině či po schodech.

### Pohon otočných ramen

V rovnicích (28) až (31) jsou vypočítány skutečné parametry otočného mechanismu postranních ramen. Z důvodu zvolení stejného pohonu jako pro jízdu podvozku vpřed a vzad je skutečný výkon pohonu stejný.

### Výstupní otáčky pohonu otočného ramene:

$$n_{Cn2} = \frac{n_{Nn}}{i_{40}} = \frac{3000}{40} = 75 \text{ min}^{-1} \quad (28)$$

### Výstupní otáčky otočného ramene:

$$n_{Cr} = \frac{n_{Cn}}{i_{OK}} = \frac{75}{4} = 18,75 \text{ min}^{-1} \quad (29)$$

### Skutečná rychlost robotu:

$$v_{Cn2} = \frac{2 \cdot \pi \cdot r_{k2} \cdot n_{Cn2}}{60} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 0,022 \cdot 75}{60} = 0,173 \text{ m/s} \quad (30)$$

### Skutečný krouticí moment:

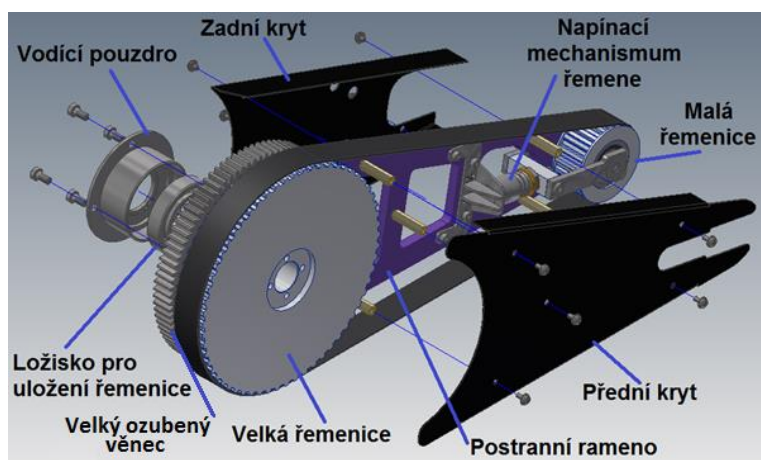
$$M_{k2} = \frac{P_{Cn} \cdot r_k}{v_{Cn}} = \frac{177,7 \cdot 0,022}{0,173} = 22,6 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (31)$$

Výsledné otáčky a rychlost otáčení ramene jsou považovány za dostačující. Rychlost otáčení ramene není potřeba při zvedání zvětšovat. Naopak při otáčení rameny bez zátěže lze předpokládat, že bude tato rychlost větší. Výsledný skutečný moment je nepatrně nižší než vypočítaný potřebný moment. Vzhledem k tomu, že lze motor přetížit až na hodnotu 2 N·m je motor s převodovkou vyhovující. Planetová převodovka poskytuje výstupní krouticí moment až 44 N·m, což je pro tuto aplikaci dostatečné. Opět jsou rozhodujícím faktorem pro volbu konkrétního typu pohonu omezené vnitřní zástavbové prostory robotu a cenová úspora při zvolení stejného typu motoru jako u pohonu pásů robotu.

#### 4.2.4 Sestava ramene pásu

Sestava ramene pásu zaručuje všechny pracovní pohyby mobilního robotu. Přes velkou ozubenou řemenici je poháněn oboustranně ozubený polyuretanový řemen umožňující robotu jízdu vpřed a vzad. Zároveň díky velkému ozubenému věnci, který je pevně přišroubován k postrannímu rameni je možné s celou sestavou ramene otáčet a vhodně tak měnit kinematiku robotu k překonání nežádoucích překážek. Detailní pohled na sestavu ramene pásu lze vidět na obrázku č. 32

Hlavním celkem sestavy je hliníkový výpalek postranního ramene, který je vyroben ze slitiny certal (EN AW 7022). Tento materiál je použit z důvodu nízké hmotnosti při dobrých mechanických vlastnostech uvedené slitiny. V dutině jednořadého kuličkového ložiska pro uložení řemenice SKF 6007 a vodícího pouzdra je otočně uložena ozubená řemenice (detail v řezu viz obrázek č. 35). Takové provedení je navrženo k eliminaci případného naklápění sestavy ramene pásu vlivem vnějšího zatížení a k zaručení vůle mezi výpalkem ramene a řemenice. Velká řemenice má po obvodu standardizované ozubení pro řemeny řady T10, přenáší krouticí moment z pohonu přes polyuretanový oboustranně ozubený řemen profilu T10, šířky 25 mm a uzavřené délky 1100 mm na malou řemenice. Oboustranně ozubené řemeny jsou použity místo gumových pásů z důvodu jednoduchosti, dostupnosti a nízké ceny. Výhodou je, že tyto řemeny jsou standardizované, je možné je zakoupit ve velkém rozsahu délek, šířek a současně umožňují přikoupit vhodné průměry řemenic. Ve většině případů se jedná o řemenice z hliníkové slitiny.



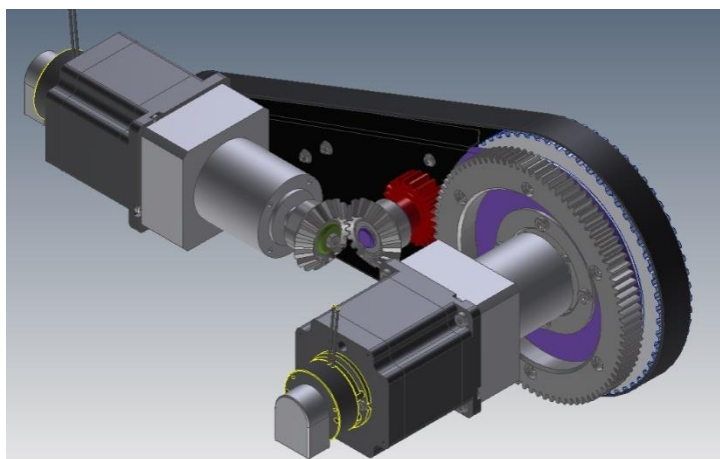
Obr. 32) Detail sestavy otočného ramene

#### Použité komponenty pro pásový pohon

- Velká řemenice – 40T10/60 [22]
  - Upravený nákupní díl tak, aby bylo možné jej uložit do vnitřní dutiny ložiska. Po obvodu má řemenice vysoustruženou drážku, která zabraňuje sklouznutí řemene. Průřez řemenice je odlehčen ke snížení celkové hmotnosti.
- Malá řemenice – 40T10/20 [23]
  - Upravený nákupní díl zasunutí jednořadých kuličkových ložisek 6203 do vnitřní dutiny. Jak lze vidět níže na obrázku č. 34 řemenice je vybavena bočnicemi, které brání samovolnému sklouznutí řemene.
- Ozubený řemen – 25T10-1100 DL [24]

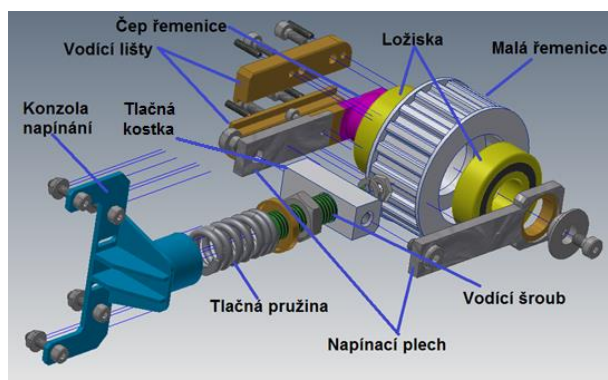
- Po konzultaci s vedoucím diplomové práce a technologem firmy Reko s.r.o. je pro aplikaci pásového podvozku zvolen výše uvedený typ řemene.

Níže na obrázku je zobrazen mechanismus otočného pohybu ramene s pásy. K výpalku ramene je přišroubován pomocí šesti šroubů ozubený věnec. Ten je osazen 88 přímými zuby s modulem 2 mm, průměr roztečné kružnice je 176 mm. Většina standardně dostupných ozubených kol na trhu je vyráběna z materiálu C45 nebo C40, které nejsou pro tuto aplikaci pevnostně vhodné. Z tohoto důvodu je ozubený věnec vyráběný díl, konkrétně z ušlechtilé konstrukční oceli 34CrNiMo6, která má vysokou mez pevnosti. Velký ozubený věnec je poháněn malým pastorkem (na obrázku červené ozubené kolo) vyrobeným ze stejného materiálu v převodovém poměru 1:4. Krouticí moment od pohonu je přenášán pomocí kuželového soukolí v převodovém poměru 1:1. Uvedená kola s modulem ozubení 3 mm jsou nákupní díly v kaleném provedení z materiálu C45. Kuželové ozubené kolo [29] a malý ozubený pastorek jsou společně uloženy na hřídeli, přenos kroutícího momentu je realizován pomocí těsného pera. Detailní pohled na mechanismus ozubenými koly je uveden na obrázku č. 33.



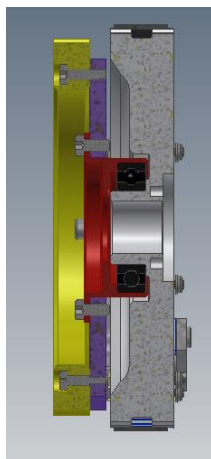
Obr. 33) Komponenty pohonů pracovních pohybů robotu

Pevnostní výpočet a kontrola ozubení na ohyb a dotyk jsou v příloze č. 9. Návrh ozubeného převodu je proveden v softwaru MITCalc. Ozubená kola s přímými zuby jsou navržena s ohledem na životnost 10000 hodin. Výsledné minimální koeficienty bezpečnosti jsou pro dotyk 1,34 a pro ohyb 3,24. Obdobně je proveden pevnostní výpočet pro kuželové soukolí v příloze č. 10. Kde výsledné bezpečnostní koeficienty nabývají hodnot 1,2 pro dotyk a 1,65 pro ohyb.



Obr. 34) Rozpadlý pohled napínacího mechanismu ozubeného řemene

Sestava ramene pásu je vybavena napínacím mechanismem řemene. Detail a rozpad lze vidět na obrázku č. 34. Tlačná pružina je vedena mezi zeleně zvýrazněným šroubem a vnitřní dutinou svařence konzoly napínání, přes podložku a matici působí silou na tlačnou kostku ve směru napínání řemene. Tlačná kostka je sešroubovaná s napínacími plechy, které z obou stran přenášejí napínací sílu na rotační čep řemenice, čímž dochází k propnutí řemene. Napínací plech je z jedné strany uložen do vodících lišt, aby bylo eliminováno případné namáhání na vzpěr a také k lepšímu vedení napínacího mechanismu. Díly žlutooranžové barvy na obrázku č. 34 jsou navrženy z kalitelné oceli z důvodu většího namáhání na otlacení. Jednotlivé díly jsou společně spojeny pomocí šroubů a jejich vzájemná poloha je zaručena vhodně zalisovanými válcovými kolíky. Při detailním pohledu do výkresové dokumentace lze postřehnout, že kruhové díry pro kolíky jsou na některých součástech nahrazeny přesnými drážkami k ulehčení montáže sestavy a k eliminaci výrobních nepřesností.



Obr. 35) Řez velkou řemenicí

Tlačná pružina je navržena pomocí design akcelérátoru programu Inventor. Návrh pružiny je uveden v příloze č. 8. Ze vstupního silového zatížení jsou určeny potřebné základní rozměry pružiny. Pracovní zatížení 450 N jednotlivých pružin je stanoveno s bezpečností tak, aby v případě plného zatížení robotu (tzn. maximální reakční síla od podložky na tíhovou sílu dosahuje hodnoty cca 320 N) nedošlo k prověšení řemene. Výsledná použitá pružina s průměrem drátu 3,35 mm je navržena ze standardně používané pružinové oceli 17 223, které běžně dodává nebo na míru vyrábí např. firma Alcomex. [30]

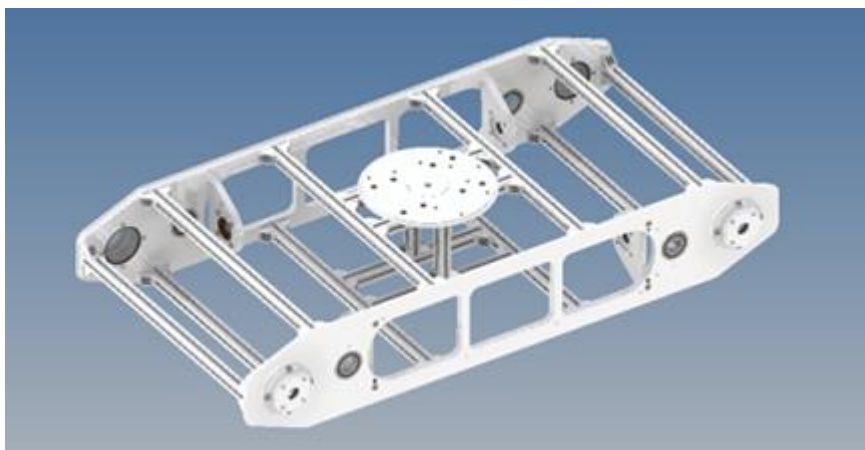
Malá řemenice je uložena otočně na čepu v oboustranně utěsněných jednořadých kuličkových ložiscích 6203. Stejně jako pro ozubené převody je pro návrh ložisek použit program MITCalc. Výpočet ložiska velké řemenice je uveden v příloze 7. Ložiska jsou dimenzována na požadovanou trvanlivost ložiska 50 000 hodin. Radiální zatížení ložiska velké řemenice je stanoveno na 700 N a axiální na 200 N. Obdobně je sestaven výpočet ložisek malé řemenice viz příloha č. 5. Zvolená ložiska bezpečně převyšují požadovanou minimální trvanlivost. Zbýlé neuvedené pevnostní výpočty potřebných spojů a dílů jsou v přílohách č. 4, 6 a 11.



Celá sestava ramene pásu je zakrytována ze přední i zadní strany. Jsou použity hliníkové plechy o tloušťce 1 mm z důvodu ušetření hmotnosti. Vnější krytování sestavy ramene plní spíše bezpečnostní funkci. Krytování může částečně zabránit vniknutí nečistot a vlhkosti do vnitřního prostoru sestavy. Kvůli vzájemným pohybům jednotlivým dílům sestavy však není těsněná. Hliníkové oplechování zabraňuje nežádoucímu vložení cizích předmětů mezi pohybující se součásti a zároveň zabraňuje možným úrazům o pohybující se součásti.

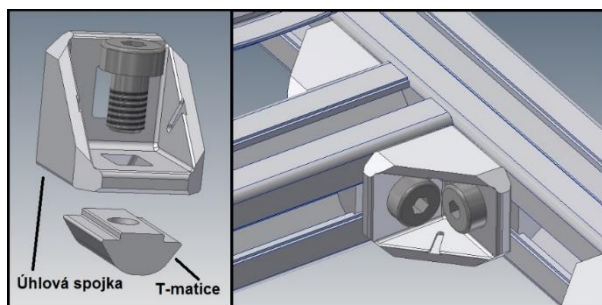
#### 4.2.5 Nosný rám

Hlavní nosnou částí celého mobilního robotu je jeho rám. Celkový náhled je znázorněn viz obrázek č. 36. Rám je sestaven z několika částí, které jsou k sobě připevněny pomocí šroubových spojů tak, aby bylo možné jej kdykoliv rozebrat a případně dle potřeb modifikovat. Celá nosná konstrukce robotu je navržena z hliníkové oceli k maximální úspoře výsledné hmotnosti. V rámci návrhu celého zařízení byla zkonstruována ještě jedna varianta nosného rámu z částečně svařovaných a sešroubovaných čtvercových ocelových trubek, která však měla vzhledem k minimální finanční úspoře značně vyšší hmotnost než zvolená konstrukce.



Obr. 36) Konstrukce nosného rámu

Jednotlivé nosníky rámu jsou nákupní normalizované stavebnicové hliníkové profily, které se běžně používají pro stavbu jednoúčelových strojů, 3D tiskáren a jiných zařízení. Konkrétně byl použit profil 20 od firmy Bosch Rexroth [20]. Tento modulární systém nabízí nemalé portfolio dílů, které je možné společně sestavit a vytvořit tak výsledný celek splňující vstupní požadavky. Jak je vidět na obrázku č. 37 jednotlivé komponenty jsou spojeny pomocí úhlových spojek a T-matic zasunutých do vnitřních drážek hliníkových profilů [20].

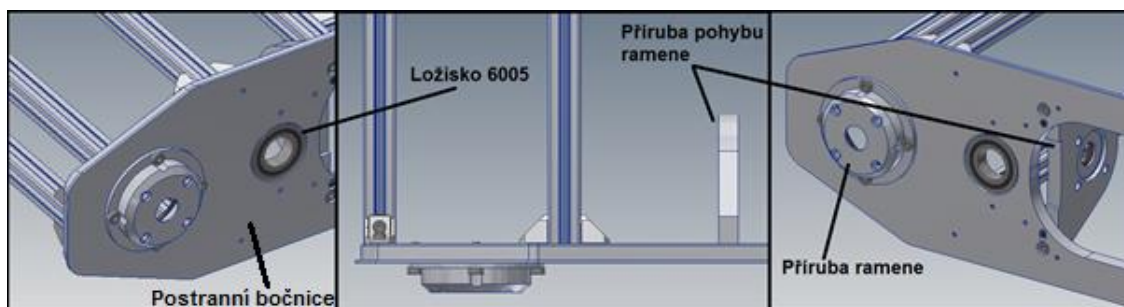


Obr. 37) Uchycení pomocí T-matic a úhlových spojek [20]

Vnitřní T-drážky profilů umožňují v případě potřeby připevnění nebo uchycení dalších částí a periférií robotu. Tento design lze také vhodně využít k připevnění rozvodů elektrické

energie. Zbylé další vyráběné díly jsou navrženy z hliníkové slitiny EN AW 7022 známé jako certal, která se při své nízké hmotnosti blíží svými mechanickými vlastnostmi uhlíkové oceli.

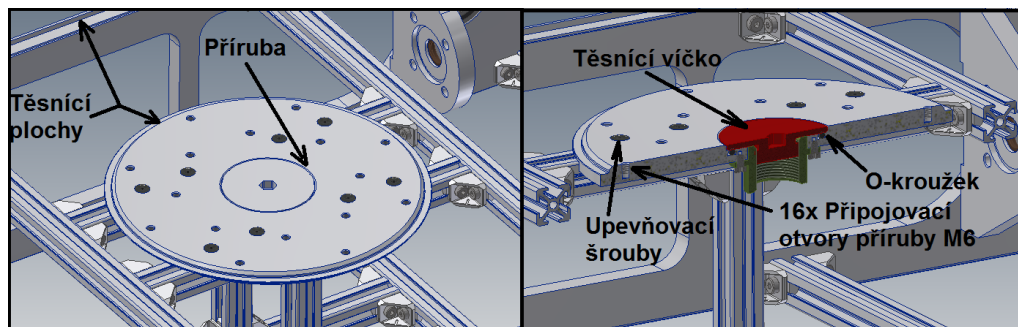
Dominantou nosného rámu jsou jeho postranní bočnice. Každá z nich je tvořena hliníkovým výpalkem z jednoho kusu, do kterého jsou vyfrézované a vyvrtané potřebné prvky k uchycení pohonů, krytování atp. Na postranní bočnice se připevňují všechny pohonné jednotky robotu. Po stranách jsou k nim přišroubovány příruby ramene pohonů hlavního pohybu robotu a příruby motorů pro otočný pohyb ramene. Do připraveného otvoru hliníkového výpalku jsou dále nalisovaná ložiska pro uložení hřídelí s kuželovým kolem a ozubeným pastorkem. Jednotlivé díly lze vidět na obrázku č. 38.



Obr. 38) Konstrukční detaily bočnice nosného rámu

Ze vnitřní strany hliníkových bočnic je pro každý z pohonů otočného ramene přišroubovaná hliníková příruba, která slouží k připevnění pohonu (uvedeno uprostřed na obrázku č.38). Ve vnitřní dutině příruby je zalisována bronzová vložka, o kterou je opřeno kuželové ozubené kolo. Zmíněný materiál je použit z důvodu dobrých třecích vlastností.

Rám pásového robotu je osově symetrický. V jeho středu je umístěna kruhová příruba, která společně s T-drážkami konstrukce umožňuje přišroubování externího nákladu na robot. Připojovací interface je tvořen 8 závitovými dírami M6 na průměru 120 mm a 8 závitovými otvory M6 na průměru 180 mm. Rotační příruba dále nabízí přístup do vnitřního prostoru robotu po odšroubování těsnicího víčka – červený díl v pravé části obrázku č. 39. Zelená vodící trubka v pravé části obrázku umožňuje připevnění externího nákladu robotu na závit M27x1,5 nebo může sloužit pro vytáhnutí zdroje elektrické energie od akumulátorů robotu. Vnější plochy hliníkových bočnic a velké středové příruby jsou upraveny jako dosedací plochy vnějšího krytování robotu, slouží k nalepení těsnění nebo tmelu zabráňující vnik nežádoucího prachu a vlhkosti.



Obr. 39) Upínací rotační příruba



#### 4.2.6 Sestava akumulátorů

Pro zajištění mobility je robot vybaven zdrojem elektrické energie. Nejrozšířenějšími zdroji el. energie jsou akumulátory – obnovitelné zdroje elektrické energie, které umožňují opakovatelné nabíjecí cykly. Mezi důležité parametry patří maximální proudová zatížitelnost, velikost vnitřního odporu, rychlost samovybití, životnost, teplotní podmínky, kapacita, počet nabíjecích cyklů, existence paměťového efektu, hmotnost a rozměry. [14]

Vzhledem k uváděným vlastnostem a velké rozšířenosti na trhu jsem se rozhodl použít baterii LiFePo4 – Lithium-železo-fosfátový akumulátor. Jak již bylo zmíněno mezi její výhody patří zejména velká rozšířenost na trhu, tzn. není problém s dostupností v různých rozměrech, kapacitách atd. Tento typ baterie umožňuje vysoký rozsah skladovacích a pracovních teplot, nízké samovybití, nízké snižování kapacity během životnosti baterie. LiFePo4 zdroj elektrické energie také umožňuje oproti jiným druhům akumulátorů odebírat vysoký proud po delší časový úsek a nabízí také počet nabíjecích cyklů v řádech 1000. [24]

##### Návrh kapacity akumulátoru:

Jmenovité napájení jednotlivých pohonů je 48 V, proto je vhodně použít akumulátor se stejným jmenovitým napětím. Požadovaným parametrem je výdrž baterie po dobu minimálně jedné hodiny, vzhledem k tomuto požadavku je níže v tabulce č. 9 navržena potřebná kapacita akumulátoru. Při pohledu na tabulku je zřejmé, že největší proudový odběr vytváří osm motorů. Při dlouhodobém odebírání proudu vyššího než je maximální dovolený odebíraný proud z akumulátoru, dochází ke snižování životnosti akumulátoru. K určení kapacity a typu akumulátoru je tedy důležitá hodnota jmenovitého odebíraného proudového, ale také maximálního odebíraného proudu.

Tab 9) Proudové odběry

Komponenta	Počet ks	Nominální napětí [V]	Spotřeba proudu [A]	Maximální spotřeba proudu [A]
Motor Nanotec DB87S01-S	8	48	6,25	19
Brzda BWA-1,5-6,35	8	24	0,5	-
Enkodér WEDS5541-B06	8	5	0,06	-
Ventilátor CFM-8010-13-10	2	12	0,24	-
Celkem	Jmenovitý proudový odběr		54,96 A	
	50 % z jmenovitého odběru proudu		27,48 A	
	Maximální proudový odběr			152 A

Pozn.: Při práci robotu se nepředpokládá, že budou proud z akumulátoru odebírat všechny motory zároveň po celou dobu práce podvozku. Z toho důvodu bylo uvažováno pouze o 50 % z celkového jmenovitého proudového odběru

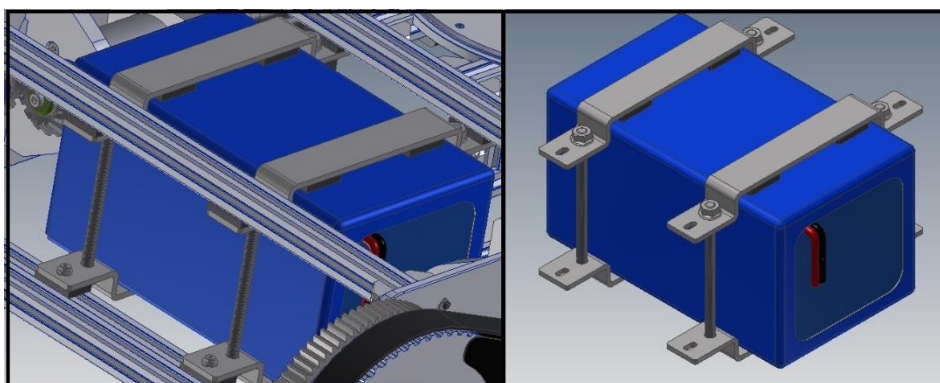
Na základě výpočtu je podvozek vybaven dvěma akumulátory každý o kapacitě 20Ah. Rozhodující je zejména maximální možný odebíraný proud, který při použití dvou akumulátorů

dosahuje hodnoty  $152/2=76$  A. Samozřejmě při úvaze, že jednotlivá elektronická zařízení budou k akumulátorům připojena napůl (čtyři pohony k jednomu akumulátoru a čtyři pohony k druhému akumulátoru). Při použití dvou akumulátorů je jmenovitý odběr  $27,48/2=13,74$  A, takže použitý akumulátor s kapacitou 20Ah bez problému zvládne nepřetržitý jedno hodinový provoz. Vzhledem ke své kapacitě má použitý zdroj el. energie ve srovnání s podobnými produkty na trhu také vhodné vnější rozměry. Bližší technické parametry ke zvolenému akumulátoru jsou uvedeny v tabulce č. 10.

Tab 10) Parametry zvoleného akumulátoru [33]

Elektrický akumulátor LiFePO4 -20 Ah, 48 V,	
Jmenovitá kapacita	20 Ah
Jmenovité napětí	48 V
Jmenovitý vybíjecí proud	20 A
Maximální okamžitý vybíjecí proud	100 A
Maximální průběžný vybíjecí proud	50 A
Rozměry	240 x 140 x 130 mm
Hmotnost	9 kg

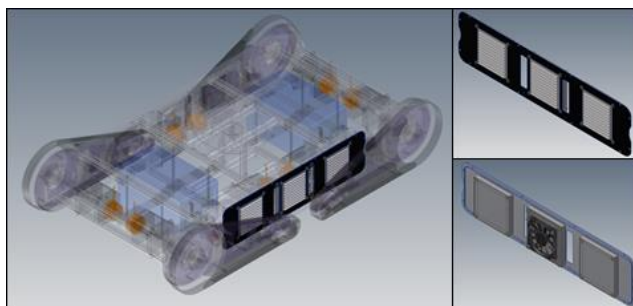
Sestava pro umístění akumulátorů do rámu je navržena jako co nejjednodušší a za malé finanční náklady. Akumulátor je obepnut sešroubovanou konstrukcí tvořenou ohýbanými pásy a závitovými tyčemi, jak je vidět na obrázku č. 40. Mezi akumulátorem a ocelovými komponenty je vložena guma [31] tak, aby se snížilo přenášení nežádoucích vibrací z rámu do akumulátorů. Celý rám sestavy napájení je přišroubován pomocí šroubů a t-matic na hliníkové profily nosného rámu robotu viz obrázek č. 40. Obdobně jsou mezi hliníkové profily a sestavu akumulátorů z důvodu eliminace šíření vibrací vloženy gumové podložky.



Obr. 40) Sestava akumulátoru

#### 4.2.7 Další komponenty

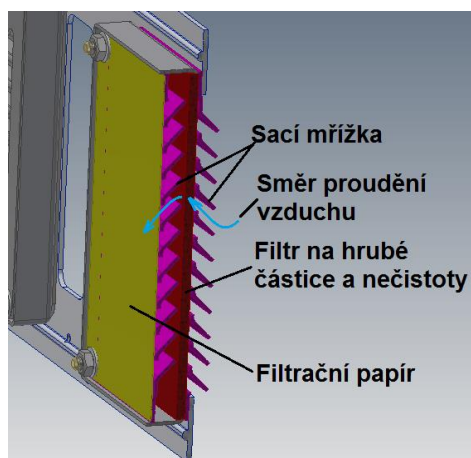
##### Sestava ventilace vnitřního prostoru



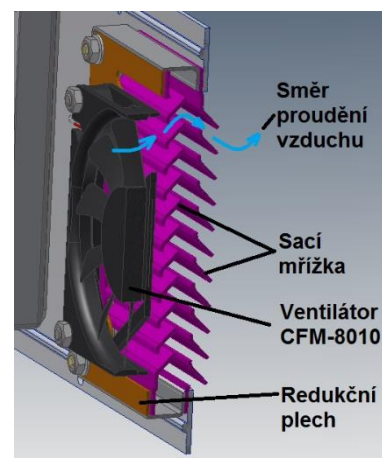
Obr. 41) Sestava pro ventilaci vnitřního prostoru pásového podvozku

Na obrázku č. 41 je zobrazen detail sestavy pro ventilaci vnitřního prostoru robotu po obou stranách hliníkových bočnic nosného rámu. Celá sestava ventilace je koncipována tak, aby zároveň plnila funkci bočních krytů robotu. Skládá se z hliníkového plechu o tloušťce 1 mm, na který jsou přišroubovány další komponenty. Plech má v sobě vypálené tři totožné otvory, do kterých jsou přišroubovány sací mřížky, filtry apod. O odvod tepla z vnitřního prostoru se stará PC ventilátor o rozměrech 80x80x10 mm. [28] Zbylé dva otvory tvoří průduchy pro nasávání vzduchu do vnitřního prostoru robotu. Detaily sestavy jsou uvedeny na obrázcích č. 42 a 43. Sestava ventilace je navržena tak, aby bránila vniknutí nežádoucího prachu a vody do vnitřního prostoru robotu, na hliníkový kryt jsou přišroubovány dvojice sacích mřížek [29], které zabráňují přímému proniknutí vody a kapalin.

Níže vlevo na obrázku č. 42 je v řezu zobrazen průduch pro sání vzduchu. Mezi dvěma sacími mřížkami, které jsou vůči sobě pootočené o 180° stupňů je umístěn filtr [26] na hrubé prachové částice a nečistoty. Žlutě zvýrazněný prachový filtr [27] slouží k zachycení drobných částic prachu. Na pravém obrázku č. 43j v řezu detail ventilátoru, který odvádí vzniklé teplo z vnitřního prostoru robotu. Jednotlivé části jsou spolu sešroubovány a omezeny plastovými podložkami, které zabráňují vniknutí vody. Na všechny plechové části a jejich dosedací plochy jsou nalepena gumová těsnění, případně jsou mezery vyplněny izolačním tmelem. Celá sestava je modulární a po drobné úpravě je možné jednotlivé pozice sacích otvorů a ventilátorů přehodit, tzn. odvádět přebytečné teplo je možné např. diagonálně skrz mobilní podvozek.



Obr. 42) Sací průduch krytování



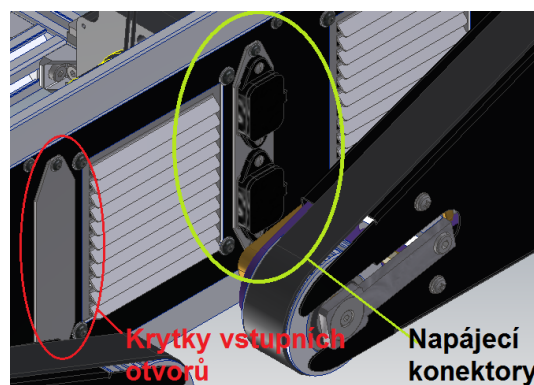
Obr. 43) Ventilací průduch krytování

### Napájecí konektory a další elektronika

V sestavách pro ventilaci vnitřního prostoru jsou předpřipravené otvory pro vyvedení elektroniky, případně pro jakékoliv jiné účely. Každý z plechu bočnice má v sobě vypálené dva otvory. Na pravé straně robotu je bočnice osazena dvěma síťovými konektory na 230 V do panelu IEC C13 [27] pro napájení akumulátorů. Konektory jsou umístěny na pravé straně robotu, kde jsou částečně kryté a schované z pohledu případného styku s vodou či jinou kapalinou. Síťové konektory jsou vybaveny voděodolnou krytkou, která zabraňuje vniku kapaliny viz obrázek č. 44. Každý z konektorů slouží k napájení jednoho akumulátoru. Drobnou nevýhodou umístění napájecích konektorů z boku robotu může být v případě využití automatického cyklu zajetí do nabíjecí stanice. Takto umístěné elektrické přípojky mohou zmíněný naprogramovaný cyklus a automatické připojení napájecích kabelů komplikovat. Umístění a detail konektorů je možné vidět na obrázku

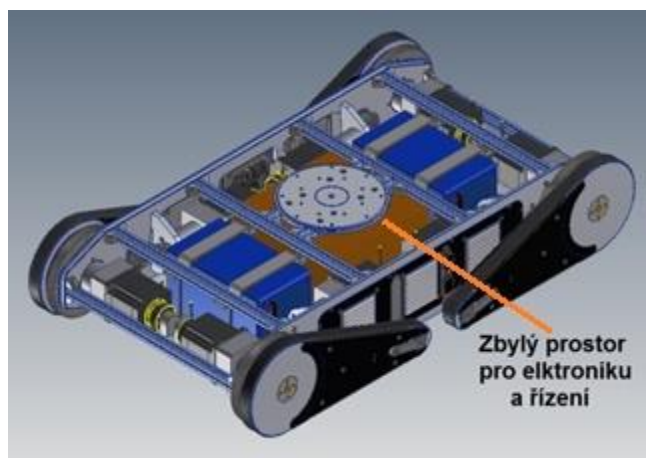


Obr. 44) Konektor napájení akumulátorů [27]



Obr. 45) Umístění napájecích konektoru na nosném rámu

Červeně označená nerezová krytka na obrázku č. 45 kryje vstupní otvor do vnitřního prostoru pásového robotu. Po odmontování je možné krytku nahradit např. sběrnici pro datové, síťové, či jiné napájecí konektory, které jsou potřebné pro řídicí elektroniku.



Obr. 46) Zbytkový vnitřní prostor robotu

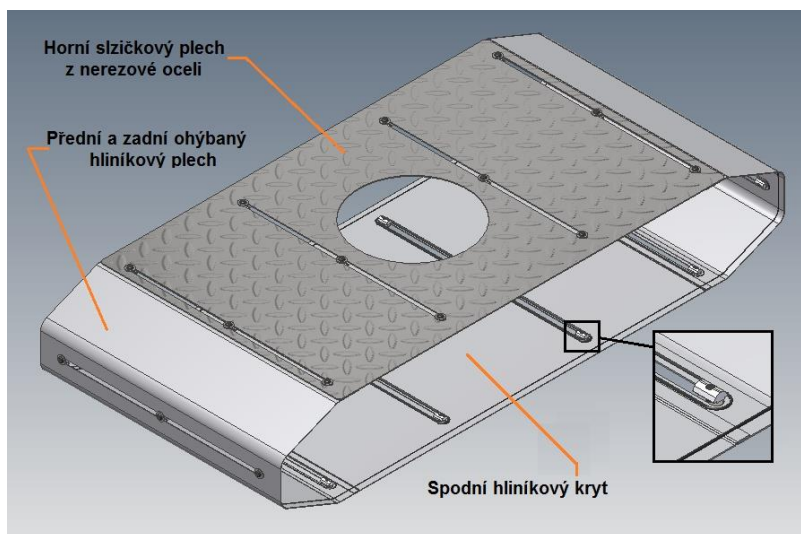
Z důvodu, že celé zařízení je navrženo pouze z mechanického hlediska, není návrh potřebné elektroniky pro řízení robotu do detailu propracován. Uprostřed nosného rámu robotu

zůstal prostor, který je však pro tyto účely umístění připraven. Výše na obrázku č. 46 je zvýrazněn oranžovou barvou a zabírá přibližně 250x250x120 mm. Zbylý prostor samostatně zaujímá tvar kvádrů, který má vnitřní objem přibližně 7,2 dm<sup>3</sup> a je omezený dvěma výztužemi pro nosnou přírubu nosného rámu podvozku. Uvedené místo může sloužit pro uložení řídicí elektroniky, Wi-Fi routeru, čidel pro kontrolu vnitřní teploty, potřebné kabeláže apod. Ostatní zbylé vnitřní prostory podvozku nejsou zaplněny na 100 %, tzn., že je možné najít i další jiná místa, která lze pro uložení elektroniky použít. Jejich uplatnění může sloužit zejména pro rozvody elektrické kabeláže.

Původním plánovaným vylepšením konstrukce robotu bylo umístit do nosného rámu podvozku mechanismus pro vyrovnávání vodorovné roviny upínací příruby. Tento mechanismus by sloužil zejména při najetí na nakloněnou rovinu a udržoval by připevněný náklad neustále v absolutně vodorovné poloze. Pohon a části zmíněného mechanismu by zabíraly většinu pozůstalého místa uvnitř pásového podvozku. Z tohoto důvodu se nakonec z požadavku pohyblivé příruby ustoupilo a rotační upínací plocha je fixně přišroubovaná k nosnému rámu, jak je uvedeno v kapitole 5.2.5. V případě použití natáčecího mechanismu by byl nevýhodou značný nedostatek místa pro potřebnou elektroniku.

#### 4.2.8 Vnější krytování podvozku

Sestava vnějšího krytování je navržena s ohledem na malé cenové náklady. Horní kryt hlavní upínací plochy je tvořen nerezovým slízkovým plechem o tloušťce 1,5 mm, který umožňuje vyšší oteruvzdornost a zároveň v případě nutnosti stoupnutí obsluhy na upínací plochu. Přední, zadní a spodní kryty podvozku jsou tvořeny hliníkovými plechy o tloušťce 1 mm. Tento materiál je zvolen především z důvodu ušetření celkové hmotnosti krytování. Vnější kryty jsou připevněny na nosnou konstrukci rámu pomocí šroubů a t-matic, které jsou vloženy do upínacích drážek hliníkových profilů nosného rámu. V jednotlivých krytech jsou v místech upínacích drážek hliníkových profilů vypálené drážky, díky čemuž je možné hliníkové profily nosného rámu využít k připevnění externího nákladu, osvětlení, kamer a jiného vybavení, jak je možné vidět na obrázku č. 47. Vnější krytování plní estetickou a ochrannou funkci vůči vnějším vlivům. Na styčné plochy krytování a nosného rámu jsou přilepena pryžová těsnění [34] k utěsnění vnitřního prostoru proti vniknutí vody nebo prachu. Těsnost vnějšího krytování by měl navrhovatel po zhotovení finálního prototypu otestovat a případné mezery způsobené výrobními a montážními nepřesnostmi utěsnit tmelem.



Obr. 47) Vnější krytování nosného rámu

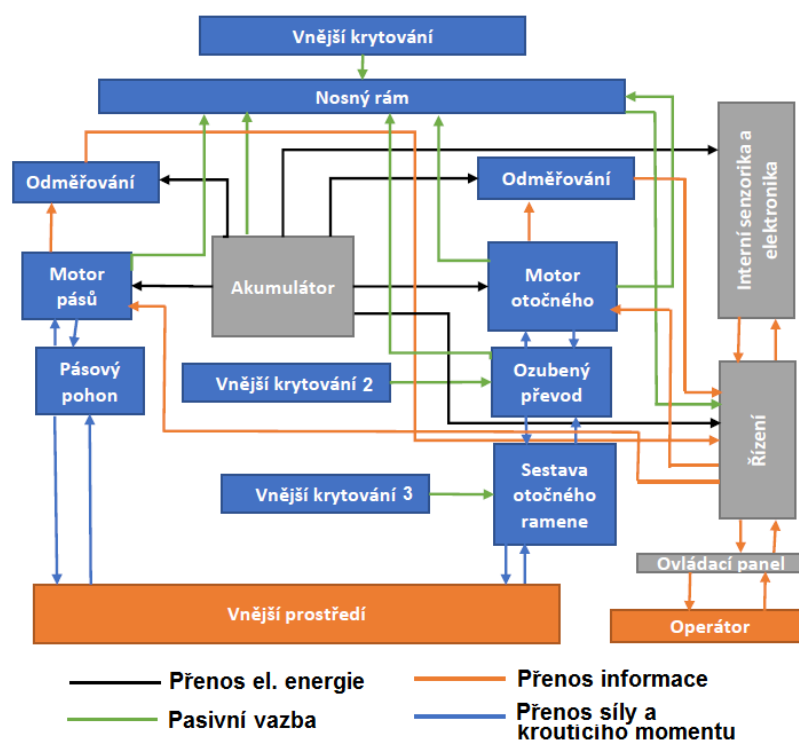




## 5 ANALÝZA RIZIK

Pro posouzení rizika u daného zařízení je postupováno dle ČSN EN ISO 12100 [15] a dále podle literatury [13]. Uvedená norma slouží konstruktérům jako souhrnný systém nebo návod při vývoji strojního zařízení tak, aby byla konstrukce stroje bezpečná při jeho předpokládaném používání. [norma] Zkonstruované zařízení je navrženo jako laboratorní robot, jehož eventuální realizace proběhne v rámci jednoho vývojového prototypu. **Analýza rizik je provedena za předpokladu, že by se z navrženého a vyrobeného prototypu podvozku stalo prodávané strojní zařízení, které se může dostat do rukou koncového zákazníka.** Pro detailní strukturu mobilního podvozku je níže na obrázku č. 48 vytvořeno blokové schéma. Při realizaci posouzení rizik daného zařízení je postupováno následovně: [13], [15]

- určení mezních hodnot zařízení a příslušných nebezpečných situací
- identifikace nebezpečí a příslušných nebezpečných situací
- odhadnutí rizika pro každé identifikované nebezpečí a nebezpečnou situaci
- zhodnocení s následným vyloučením rizika nebo snížením rizika spojeným s nebezpečím [13], [15]



Obr. 48) Blokové schéma čtyřpásového mobilního podvozku

### 5.1 Mezní hodnoty

- vymezení používání
  - Provozní režimy – poloautomatický a servisní režim
  - Popisovaný mobilní robot má poloautomatický režim, kdy je vzdáleně ovládána jízdní trajektorie zařízení pomocí dálkového ovládání operátorem. Operátor pomocí dálkového ovládání, které je vybaveno klávesami, páčkami a jinými potřebnými ovládacími prvky, ovládá jízdu pásového podvozku. Během ovládání jízdy je robot pod

neustálým dohledem operátora. Servisní režim zařízení nastává v případě detekování chyby nebo závady pomocí vnitřní elektroniky a senzoriky robotu nebo po odejmutí horního krytu podvozku. V případech, kdy dojde k servisnímu režimu, je obsluha povinná zařízení vypnout a vyhledat odbornou pomoc nebo servisního technika daného zařízení. Bližší rozsah použití je popsán v kapitole 5.

- Úroveň zácviku – Obsluha mobilního podvozku je povolena proškoleným osobám, které jsou zároveň poučeny o bezpečnosti práce se zařízením a případných rizicích. Správu a opravy zařízení provádí servisní technik, který je zaškolen o údržbě a seřizování daného zařízení, je poučen o bezpečnosti práce se zařízením a případných rizicích
- Vystavení jiných osob nebezpečím, která jsou spojena s uvedeným strojním zařízením – osoby pohybující se ve stejném prostoru jako pásový podvozek musejí být poučeny o případných rizicích při pohybu okolo zařízení. Návštěvníci a široká veřejnost jsou poučeni o obecných bezpečnostních pravidlech v rámci interních norem a směrnic daného podniku či firmy, kde je zařízení použito.
- b) Vymezení prostoru
  - Rozsah pohybů – je blíže specifikován v kapitolách 5 a 8.
  - Rozsah stroje – dodávka energie – zařízení obsahuje vnitřní zdroj elektrické energie (bližší informace viz 5.2.6), po stranách je robot vybaven elektrickými přípojkami pro elektrickou energii.
- c) Vymezení doby
  - Životnost – uvažovaná životnost celého zařízení je 2000 hodin, zvláštní kontrole podléhají zejména postranní ozubené řemeny/pásky a napínací mechanismus – kontrola přibližně 1x za 200 hodin. Stanovení životnosti a nutnosti pravidelné kontroly je blíže specifikováno na základě provedených budoucích testů vyrobeného prototypu.
- d) Ostatní vymezení
  - Udržovatelnost – zařízení je nutné nevystavovat zbytečnému znečištění. Je doporučeno podvozek pravidelně čistit.
  - Prostředí – zařízení je určeno do vnitřních prostor, nesmí být vystaveno vodě a dlouhodobému přímému slunečnímu záření. Doporučené provozní podmínky jsou: teplota 10–30 °C, vlhkost 50 % při teplotě 30 °C.

## 5.2 Identifikace nebezpečí

Cílem je systematicky určit rozumně předvídatelná nebezpečí, nebezpečné situace a nebezpečné události ve všech fázích životního cyklu stroje: [13], [15]

1. Doprava, montáž a instalace
2. Uvedení do provozu
3. Používání
4. Vyřazení z provozu, demontáž a likvidace

Předvídatelné nebezpečné situace jsou uvedeny níže v tabulce č. 11. Následuje tabulka č. 12, která analyzuje nebezpečné komponenty zařízení a rizika, která mohou způsobit.



Tab 11) Zjištění nebezpečí

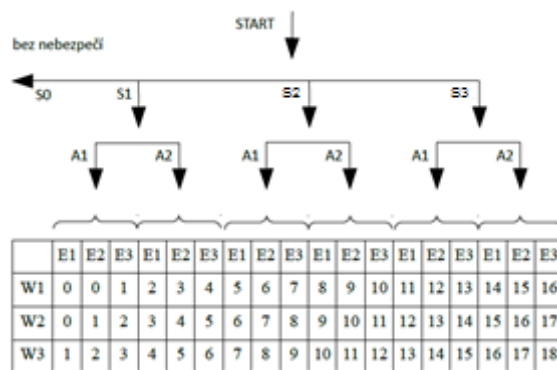
Označení	Název nebezpečí	Životní cyklus
1	Mechanická nebezpečí	
1.1	Nebezpečí stlačením	
1.1-1	Nebezpečí stlačení otočným ramenem	1, 2, 3
1.1-2	Nebezpečí stlačení osoby mezi pohybující se podvozek a jiný předmět	1, 2, 3
1.2	Nebezpečí zachycení o rotující části zařízení	
1.2-1	Nebezpečí zachycení mezi pohybující se řemen a řemenice	1, 2, 3
1.2-2	Nebezpečí zachycení se o mechanismus napínání řemene	1, 2, 3
1.3	Nebezpečí pořezání o ostré hrany	
1.3-1	Nebezpečí pořezání o ostré hrany krytování	1, 2, 3, 4
1.3-2	Nebezpečí pořezání o ostré hrany otočného ramene	1, 2, 3, 4
1.3-3	Nebezpečí pořezání o ostré hrany nosného rámu	1, 2, 3, 4
1.4	Nebezpečí stříhu o pohybující se zařízení	
1.4-1	Nebezpečí stříhu v pohybujícím se ozubeném převodu	1, 2, 3
1.4-2	Nebezpečí stříhu o pohybující se otočné rameno a nosný rám	1, 2, 3
1.5	Nebezpečí pádu zařízení na osobu	1, 2, 3, 4
1.6	Nebezpečí přejetí osob	1, 2, 3
2	Elektrická nebezpečí	
2.1	Nebezpečí zásahu elektrickým proudem	1, 2, 3
2.2	Nebezpečí zkratu zařízení	2, 3
3	Tepelná nebezpečí	
3.1	Nebezpečí výbuchu akumulátoru	2,3
4	Ergonomická nebezpečí	
4.1	Nevhodné ergonomické zásady na paže operátora	2,3
4.2	Nepohodlí a únava způsobená špatně podsvíceným displejem	2, 3
4.3	Nevhodná konstrukce ovládacího panelu	2, 3
5	Nebezpečí způsobené ztrátou kontroly nad zařízením	
5.1	Porucha řídicího systému	2, 3
5.2	Nemožnost nouzového zastavení zařízení	2,3

Tab 12) Analýza nebezpečných komponent

Umístění v systému	Název komponenty	Druh nebezpečí
Sestava otočného ramene	Otočné rameno	Stlačení, stříh, pořezání (1.1-1, 1.4-2, 1.3-2)
	Vnější krytování 2	Pořezání (1.3-1)
	Vnější krytování 3	Pořezání (1.3-1)
	Pásový pohon	Zachycení (1.2-1, 1.2-2)
	Ozubený převod	Zachycení, stříh (1.2-1, 1.4-1)
Nosný rám	Vnější krytování	Pořezání (1.3-1)
	Akumulátor	Výbuch, zásah elektrickým proudem, elektrický zkrat (3.1, 2.1, 2.2)
	Pohon pásů	Zásah elektrickým proudem, elektrický zkrat (2.1, 2.2)
	Motor otočného ramene	Zásah elektrickým proudem, elektrický zkrat (2.1, 2.2)
	Řízení	Zásah elektrickým proudem, elektrický zkrat, porucha a ztráta kontroly (2.1, 2.2, 5.1, 5.2)
Vnější prostředí	Ovládací panel	Nepohodlí, únava (4.1, 4.2, 4.3)
	Podvozek robotu	Pád, přejetí (1.5, 1.6)

### 5.3 Odhadnutí rizik

Pro určení hodnoty rizik je zvolena kvantitativní metoda, kde jsou číselně ohodnoceny složky ovlivňující vzniklá rizika. Význam jednotlivých nebezpečných situací je závislý na závažnosti daného rizika, četnosti vystavení osob nebezpečí, možnosti vyvarování se nebo omezení úrazu a pravděpodobnosti výskytu nebezpečí. Pro posouzení rizik je postupováno dle schématu na obrázku č. 49, vysvětlení jednotlivých symbolů a složek pro ohodnocení rizik je uvedeno v tabulce č. 13. [13] Pro vyhodnocení rizik stanovují přijatelnost určených rizik na hodnotu – přijatelné riziko  $\leq 4$ .



Obr. 49) Schéma určení hodnoty rizik [13]

Tab 13) Vysvětlení složek hodnotících rizika [13]

S	Závažnost úrazu (škody)	E	Možnosti vyvarování se nebo omezení úrazu (škody)
S0	Bez nebezpečí	E1	Možné
S1	Lehké poškození (přechodné následky)	E2	Možné za určitých okolností
S2	Těžké zranění (trvalé následky)	E3	Sotva možné
S3	Smrt	W	Pravděpodobnost výskytu nebezpečné události
A	Vystavení osob nebezpečí	W1	Malá či nepravděpodobná
A1	zřídka až častěji	W2	Střední (vícekrát za život jedince)
A2	často až trvale	W3	Velká (častý výskyt nebezpečí)

Odhadnutí rizik je provedeno s ohledem na stávající konstrukci zařízení, tzn. eventuální riziko je již sníženo a bezpečnostní funkce krytů, izolace a jiných bezpečnostních prvků.

Tab 14) Vypočítané hodnoty rizik

Ozn.	Název nebezpečí	S	A	E	W	Riziko
1.1-1	Nebezpečí stlačení otočným ramenem	2	1	2	1	6
1.1-2	Nebezpečí stlačení osoby mezi pohybující se podvozek a jiný předmět	2	1	2	1	6
1.2-1	Nebezpečí zachycení mezi pohybující se řemen a řemenice	2	1	3	1	7
1.2-2	Nebezpečí zachycení se o mechanismus napínání řemene	1	1	1	1	0
1.3-1	Nebezpečí pořezání o ostré hrany krytování	1	2	1	3	4
1.3-2	Nebezpečí pořezání o ostré hrany otočného ramene	1	2	1	3	4
1.3-3	Nebezpečí pořezání o ostré hrany nosného rámu	1	2	1	3	4
1.4-1	Nebezpečí stříhu v pohybujícím se ozubeném převodu	2	2	1	1	8
1.4-2	Nebezpečí stříhu o pohybující se otočné rameno a nosný rám	2	2	1	2	10
1.5	Nebezpečí pádu zařízení na osobu	3	1	2	1	12
1.6	Nebezpečí přejetí osob	2	1	2	1	6
2.1	Nebezpečí zásahu elektrickým proudem	3	1	1	2	12
2.2	Nebezpečí zkratu zařízení	2	1	1	2	6
3.1	Nebezpečí výbuchu akumulátoru	3	2	2	2	16
4.1	Nevhodné ergonomické zásady na paže operátora	1	2	1	2	3
4.2	Nepohodlí a únava způsobená špatně podsvíceným displejem	1	2	2	1	3
4.3	Nevhodná konstrukce ovládacího panelu	1	2	1	3	4
5.1	Porucha řídicího systému	2	2	2	1	9
5.2	Nemožnost nouzového zastavení zařízení	3	1	1	1	11

## 5.4 Zhodnocení rizik a bezpečnostní opatření

Výše v tabulce č. 14 jsou uvedeny výsledné hodnoty rizik pro eventuální možné nebezpečné situace při práci se zařízením. Součástí návrhu mechanické konstrukce jsou již zahrnuté bezpečnostní prvky, mezi které spadají veškerá vnější krytování, izolace, blatníky, ventilace vnitřního prostoru apod. Přijatelná míra rizik byla stanovena na hodnotu  $\leq 4$ . S ohledem na již obsažené bezpečnostní prvky podvozku je možné v uvedené tabulce č. 14 vidět šedě zvýrazněné hodnoty rizik pro uvedená nebezpečí, jejichž hodnoty překračují stanovenou přijatelnou mez rizika.

V rámci další budoucí práce na zařízení je nutné jej dovybavit dalšími konstrukčními bezpečnostními prvky a body v dokumentaci, které povedou ke snížení všech výše uvedených rizik. Vhodné jsou zejména bezpečnostní prvky týkající se vnitřní sensoriky a elektroniky robotu, které napomůžou odstranění zejména nebezpečí plynoucích z elektrické energie. Zařízení je vhodné vybavit vnitřním teplotním čidlem pro hlídání teploty v oblasti akumulátorů, snímačem k odstavení zdroje elektrické energie v případě odmontování vnějších krytů. Pro práci v laboratoři je nutné zařízení vybavit vnějším osvětlením a zvukovým signalizačním zařízením. Řídicí systém musí být vybaven logikou vedoucí k odstavení elektrické energie v případě ztráty komunikace mezi teleoperátorem (obsluhou) a řídicím systémem. Je nutné pro zařízení sestavit zaškolovací plán, bezpečnostní a ovládací manuál, které povedou ke snížení všech zbylých rizik plynoucích z práce se zařízením.

## 6 ZHODNOCENÍ

### 6.1 Výsledné parametry

Základní parametry charakterizující zkonstruovaný čtyřpásový podvozek jsou uvedeny níže v tabulce 15.

Tab 15) Výsledné parametry mobilního zařízení

Vnější rozměry	
- při minimální délce povozku	195 x 589 x 995 mm
- při maximální délce podvozků	195 x 589 x 1544 mm
Rozteč pásů	541 mm
Celková délka	1000 mm
Hmotnost bez nákladu	105 kg
Nosnost	25 kg
Parametry motorů podvozků	4 x 220 W, 48 V
Parametry motorů otočných ramen	4 x 220 W, 48 V
Minimální světlá výška podvozků	11,5 mm
Maximální světlá výška podvozků	285 mm
Akumulátory	2 x 20 Ah, 48 V
Úhel rozsahu otočných ramen	360 °

### 6.2 Cenové zhodnocení

Pro představu reálných nákladů potřebných k sestavení jednoho prototypu robotu je v tabulce č. 16 vypočítaná předběžná finální hodnota celkových nákladů prototypu pásového podvozků. Ačkoliv je navržený machineware robotu bez elektroniky a řízení pouhým elementem z celkového plně funkčního zařízení, mechanika tvoří podstatnou část z celkové ceny. Vypočítané náklady jsou stanoveny za předpokladu, že podvozek bude vyroben v prostorách školní dílny. Pro mechanické vyráběné díly jsou stanoveny ceny polotovarů na základě běžně dostupných internetových cen dodavatelů materiálů a pro nakupované díly jsou uvedeny internetové ceny z e-shopů.

Částky pro vybrané hlavní sestavy a komponenty jsou uvedeny v tabulce č. 16. Podrobný soupis jednotlivých položek je uveden v příloze č. 12.

Tab 16) Výsledné náklady na výrobu prototypu

Název sestavy/komponenty	Počet ks	Cena	
Nosný rám	1	8380	Kč
Sestava akumulátoru	2	25884	Kč
Sestava otočného ramene	4	30792	Kč
Sestava vnějšího krytování	1	2180	Kč
Sestava ventilace vnitřního prostoru	2	3244	Kč
Pohon DB87S01-S	8	26400	Kč
Brzda BWA-1,5-6,35	8	10770	Kč
Enkodér WEDS5541-B06	8	10110	Kč
Převodovka GPLE60-2S-25-F87	4	25860	Kč
Převodovka GPLE60-2S-40-F87	4	25860	Kč
Malé čelní ozubené kolo	4	250	Kč
Osa řemenice	4	190	Kč
Nerezové krytky	3	30	Kč
Sestava konektoru napájení	1	200	Kč
Kuželové kolo	8	4152	Kč
Sestava blatníku	4	200	Kč
Spojovací materiál a jiné drobné položky	-	500	Kč
<b>Celkové odhadované náklady na materiál</b>		<b>175002</b>	<b>Kč</b>

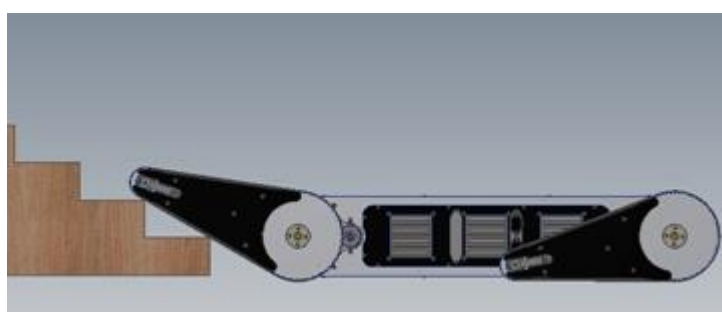
Při pohledu na výslednou cenu je patrné, že náklady jsou úzce spojeny se zhotovenou variantou pásového podvozku. Z důvodu požadované symetričnosti zařízení je potřeba celkem 8 pohonů pro jednotlivé pracovní pohyby robotu. Pohony včetně svých modulárních komponent a akumulátory tvoří většinou část ze všech potřebných nákladů na machineware robotu. Lze předpokládat, že v případě výroby většího počtu kusů lze na těchto dílech ušetřit nemalé částky. Pro vyráběné díly jsou uvedené ceny vypočítány s ohledem na potřebný polotovár pro výrobu. V částce nejsou zahrnuty příplatkové ceny za přířezy nebo logistické poplatky dodavatelů materiálů. Naopak při spolupráci s jedním dodavatelem materiálů pro koupi všech potřebných polotovarů vyráběných dílů může být poskytnuta množstevní sleva. Do celkových nákladů není zahrnuta práce lidí a režie pro výrobu.

Výsledná cena robotu může být pohyblivá také s ohledem na aktuálně nestabilní finanční trh a vývoj měn, zejména pak koruny vůči euru. Výrobce pohonů Nanotec je zahraniční firma, která obchoduje v měně euro. Nakoupené akumulátory jsou také dodávány ze zahraničí,

tzn. volba vhodné doby pro koupi jednotlivých dílů ze zahraničí může ušetřit nemalou část z celkových nákladů.

### 6.3 Rozbor pohybů robotu

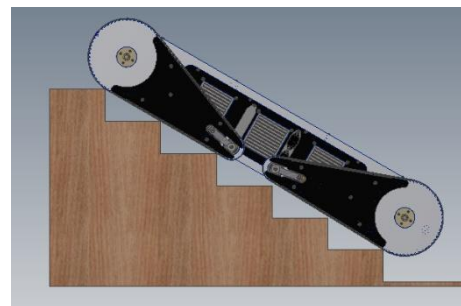
U zkonstruované varianty čtyřpásového podvozku se během vykonávání servisní nebo monitorovací úlohy předpokládá možnost zdolávat překážky, schody. V této kapitole lze vidět typická uspořádání kinematiky robotu při různých mobilních úlohách. S ohledem na uvažované ovládání pásového podvozku jsou využívány pohyby a změna kinematiky pásů závislé na obsluze zařízení. Teleoperátor na základě zkušeností a dle svého nejlepšího uvážení využije možné změny uspořádání otočných pásů, aby nedošlo k uvíznutí podvozku na překážce a zvolí vhodnou trajektorii zařízení ke zdolání nebo objetí překážky.



Obr. 50) Nájezd na schodovitou překážku



Obr. 51) Výjezd po nakloněné rovině a schodech - 1

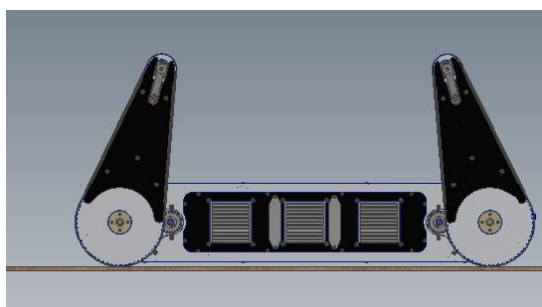


Obr. 52) Výjezd po nakloněné rovině a schodech - 2

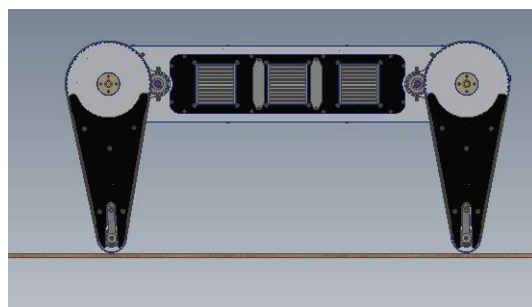
Na č. 50 až 52 je možné vidět podvozek při jízdě po schodech / nakloněné rovině, kdy jednotlivá ramena napomáhají najetí na první schod. Pro lepší manévrovatelnost je vhodné podvozek používat v základní konfiguraci, kdy jsou opásaná ramena natočena směrem k sobě viz obrázek č. 52.

Podle literatury [2] je u standardních pásových podvozků poměr délky pásů k rozteči pásů v rozmezí 1,4 – 1,6. V případě zkonstruovaného robotu je tento poměr  $L/B=1,85$ . Vnější rozměry robotu jsou mírně nestandardní, což může mít za následek sníženou manévrovatelnost při diferenčním řízení robotu, konkrétně při zatáčení. V případě, kdy jsou otočná ramena natočena směrem od sebe a kdy podvozek zaujímá nejdelší možnou délku, není doporučeno podvozek využívat k zatáčení. V takovém případě je poměr celkové délky pásů k rozteči pásů ještě větší.

Na obrázku č. 53 je pásový robot v konfiguraci, kdy mají postranní řemeny nejmenší valivý odpor vůči podložce. V takovém uspořádání se dá podvozek považovat za kolový robot s pevnými nápravami. Níže na obrázku č. 54 je mobilní robot v poloze s maximální světlou výškou podvozku, kterou lze uplatnit v případech nadjetí překážky. V obou uvedených situacích dochází ke zvýšení měrného tlaku mezi pásy a podložkou. Proto doporučuji zmíněné natočení ramen využívat pouze v nezbytných situacích při vyhýbání překážce.



Obr. 53) Nadzvednutí pásů k snížení valivého odporu



Obr. 54) Maximální světlá výška podvozku



## 7 DISKUZE

Výrobní dokumentace pásového podvozku je navržena ke zhotovení jednoho prototypu ve výrobních prostorách školní dílny. Jednotlivé díly jsou designovány z konvenčních konstrukčních materiálů, případně jako upravené díly z nakoupených komponent. Většina součástí je zhotovena z běžně dodávaných a cenově dostupných materiálů, konkrétně velké nosné celky robotu jsou navrženy z hliníkových slitin z důvodu ušetření výsledné hmotnosti.

Součásti jsou zkonstruovány pro výrobu pomocí konvenčních výrobních technologií, jako je soustružení, frézování, pálení plechů a pásů laserem nebo plazmou případně kombinací jednotlivých metod. Jako možnost použití se nabízí také v současné době populární 3D tisk, který může u jednotlivých dílů vést ke snížení hmotnosti a eventuálně i ceny.

Možná vylepšení z hlediska technologie nabízí zejména velké hliníkové řemenice a postranní bočnice. Oba zmíněné díly je možné vyrobit pomocí 3D tisku z materiálu alumid. Pro uvedenou výrobu navrhuji firmu Materialise [35], která nabízí online nacenění výrobku, volbu různých materiálů a povrchových úprav. Zvolená technologie by zjednodušila a zlevnila finální výrobu dílů. Konkrétně při načtení 3D modelu velké řemenice do online konfiguratoru ceny je pro materiál alumid výsledná cena přibližně 160 euro za díl, což se vzhledem k dalším nulovým výrobním nákladům jeví jako výborná cena. Výhodou by také bylo, že rozměry velké řemenice by bylo možné upravit dle vlastních požadavků, protože by se již nejednalo o největší možnou standardní řemenici pro vybraný typ řemene. V případě uplatnění výroby pomocí aditivních technologií u dílů velkých řemenic se jako vylepšení konstrukce nabízí právě zvětšení jejich vnějších průměrů. V současné době má pásový podvozek v základní konfiguraci velmi malou světlou výšku, čímž by se dal problém odstranit. Materiál alumid má nižší pevnosti, proto by bylo na místě nosný rám a řemenice pevnostně zkontrolovat buď výpočtem nebo vhodně zvoleným zátěžovým testem.

Konstrukce robotu je odolná vůči vlivům vnějšího prostředí. U jednotlivých dílů je navržena základní povrchová úprava. Standardní spojovací materiál je použit převážně z nerezové oceli nebo z oceli s vnějším pozinkováním. Vyráběné díly, které přicházejí do styku s vnějším prostředím jako je vnější krytování, jsou vyrobeny buď z nerezové oceli nebo z hliníkové slitiny. U hliníkových plechů je předepsáno černé eloxování vnějších ploch. Pro lepší vlastnosti robotu navrhuji do budoucna probrat tyto díly s designerem a technologem výroby a vhodně zvolit finální vnější podobu zařízení. Konkrétně např. určit lakované díly nebo jiné povrchové úpravy. To vše, aby byla zaručená dobrá odolnost vůči oxidaci a zároveň, aby produkt splňoval marketingové požadavky.

Vnitřní prostory podvozku jsou utěsněny vůči proniknutí nežádoucích prachových částic a vody. Jako zábrana je zvoleno převážně pryžové těsnění. Do budoucna navrhuji vnější konstrukci s kryty otestovat vůči vniknutí vody, které může značně poškodit elektronické části stroje. Mezery vzniklé výrobní nebo montážní nepřesností je možné utěsnit tmelem.

Možným vylepšením konstrukce se jeví nahrazení gumových podložek silentbloky v sestavě napájení. Současná varianta tlumení vibrací akumulátorů je použita z důvodu malých finančních nákladů, ale je nutné ji otestovat v provozu. V případě nedostatečného tlumení kmitů bych navrhoval celou sestavu usadit do gumových silentbloků, které jsou k tlumení nežádoucích vibrací vhodnější.

S ohledem na umístění veškeré elektroniky do vnitřních prostor robotu, navrhuji v případě zkompletovaného mobilního zařízení provést teplotní analýzu podvozku. Jednotlivá přidaná

elektronická zařízení přišroubovaná k nosnému rámu robotu jsou dalším zdrojem nežádoucího tepla, které může z dlouhodobého hlediska snižovat životnost akumulátorů. V případě, že by navržené odvětrávací PC ventilátory nezvládaly dostatečně odvádět teplo, bylo by nutné je nahradit výkonnějšími.

K tomu, aby byl mobilní podvozek plnohodnotně funkční zařízení, chybí dokončit některé zásadní celky. Současný stav dokumentace zařízení nabízí několik dalších oblastí eventuálního vývoje. Jedná se zejména o zpracování a navržení elektroniky robotu a řízení pohonů, případně návrh senzorického systému celého zařízení a softwarové zpracování rozhraní komunikace mezi obsluhou a mobilním podvozkem. Jednotlivá témata se nabízí jako případné další zadání budoucích školních závěrečných prací univerzity. Do budoucna je také nutné zpracovat dokumentaci s ohledem na provedenou analýzu rizik. Zaškolovací plán a ovládací manuál je nedílnou součástí dokumentace zařízení.

## 8 ZÁVĚR

Na základě zadaných vstupních parametrů byla navržena mechanická konstrukce čtyřpásového mobilního robotu. Během práce byly postupně splněny všechny body zadání. V první části diplomové práce je vypracována analýza současného stavu v oblasti mobilních robotů. Jsou popsány různé konstrukce podvozků, včetně jejich rozdělení a aplikace.

S ohledem na teoretickou část a zadání byl sestaven požadavkový list se vstupními parametry na budoucí design zařízení. Bylo sestaveno několik alternativ provedení robotu, která byla následně v kapitole 3.4 vzájemně porovnána pomocí kvantitativního multikriteriálního hodnocení. Byla zvolena výsledná varianta robotu, která nejvíce splňovala technickoekonomická kritéria. Pro zvolený čtyřpásový podvozek byla následně zhotovena kompletní konstrukční dokumentace mechanické části včetně všech potřebných mechanických uzlů a návrhových výpočtů. Jednotlivé soubory 3D modelu součástí, kompletní výkresová dokumentace a dílčí výpočty jsou v přílohách této práce.

Výsledné zařízení má podobu čtyřpásového podvozku, které dovoluje změnu vlastní kinematiky robotu individuálním natočením jednotlivých postranních ramen s pásy. Je navrženo pro možnou výrobu jednoho prototypu v prostorách školních dílen. Machineware zařízení je navrženo s ohledem na univerzální použití tak, že výsledná konstrukce umožňuje jízdu vpřed a vzad, jízdu po nakloněné rovině a zdolávání schodovitých překážek. Vnější stavba podvozku je symetrická a v případě nepřipojeného nákladu na horní desku je robot schopen případného otočení pásy vzhůru okolo vodorovné osy symetrie. Celková výška robotu je menší než 200 mm, což zařízení umožňuje také eventuální podjetí bariér, či překážek v jízdě. Mobilní robot umožňuje upnutí externího nákladu na vlastní nosnou konstrukci, díky čemuž je jeho stavba univerzální s možností připnutí např. kamer pro monitorovací mise nebo manipulátoru pro servisní úlohy. Výsledný robot má bez veškeré elektroniky hmotnost přibližně 90 kg a předpokládá se, že při jízdě po nakloněné rovině uveze upnutý náklad o hmotnosti až 25 kg. Výsledná hmotnost finálně zhotoveného robotu včetně připojeného externího nákladu je uvažována na 130 kg.

Pásový podvozek je vybaven dvěma akumulátory, které poskytují dostatek elektrické energie pro provoz minimálně 1 hodinu. Vnitřní prostor nosného rámu robotu je ventilován k odvedení nežádoucího vzniklého tepla. Malá část návrhu konstrukce se věnuje také utěsnění vnitřního prostoru proti vniknutí prachu a vody, což podvozek umožňuje použití zejména ve vnitřních prostorech a omezeně ve vnějším prostředí. Pásky podvozku jsou tvořeny standardními polyuretanovými oboustranně ozubenými řemeny, které dovolují jízdu po tvrdém nebo částečně zpevněném povrchu.

V kapitole 5 je vypracována analýza rizik robotu, jsou popsány a vyhodnoceny nebezpečné situace a rizika plynoucí z práce se zařízením. Výsledkem jsou navržená vylepšení bezpečnostních prvků, které mohou v budoucnu zabránit hrozícímu nebezpečí. Dále jsou v práci vypočteny celkové náklady potřebné pro zhotovení jednoho prototypu.

Pro úplnost dokumentace a finální podobu navrženého mobilního podvozku je nutné v budoucnu navrhnout potřebnou elektroniku zařízení, řídicí systém, senzorický subsystém a jiné nutné celky pro úplnost robotu.

Domnívám se, že pro další budoucí kroky je potřeba zhotovit funkční prototyp zařízení na základě výkresové dokumentace. Sestavit potřebné související konstrukční testy a měření.

V neposlední řadě je s ohledem na výsledky testů a vlastnosti finálního prototypu nutné určit konkrétní typ servisní nebo jiné mobilní úlohy, pro kterou bude navržený pásový podvozek vhodný. Lze předpokládat, že nedokončené celky robotického zařízení je možné využít jako budoucí témata závěrečných prací, které napomůžou celý čtyřpásový podvozek dokončit.

## 9 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] KOLÍBAL, Zdeněk. Roboty a robotizované výrobní technologie. První vydání. Brno: Vysoké učenítěchnické v Brně - nakladatelství VUTIUM, 2016. ISBN 978-80-214-4828-5.
- [2] SMRČEK Jiří a Ladislav KÁRNÍK. Robotika - Servisné roboty: Navrhovanie - konštrukcia – riešenia. 1. vydání Prešov, Vydavateľstvo Michala Vaška, 2008. ISBN 978-80-7165-713-2.
- [3] Bc. STUDÉNKA, Marek. NÁVRH MODULÁRNÍ KONSTRUKCE PÁSOVÉHO PODVOZKU S PROMĚNNOU KINEMATIKOU RÁMU. Ostrava, 2010. Diplomová práce. VŠB - Technická Univerzita Ostrava. Vedoucí práce Ing. Ladislav Kárník, CSc.
- [4] Bc. HANZLÍK, David. Konstrukce a realizace podvozku mobilního robotu pro monitoring. Ostrava, 2012. Diplomová práce. VŠB - Technická Univerzita Ostrava. Vedoucí práce Ing. Václav Krys, Ph.D.
- [5] SUDER, Michal. Konstrukční návrh čtyřkolového podvozku s Weinsteinovými koly. Ostrava, 2010. Bakalářská práce. VŠB - Technická Univerzita Ostrava. Vedoucí práce Ing. Ladislav Kárník, CSc.
- [6] PINHAS, BEN-TZVI. HYBRID MOBILE ROBOT SYSTEM: INTERCHANGING LOCOMOTION AND MANIPULATION [online]. Toronto, 2008 [cit. 2016-11-30]. Dostupné z: [https://tspace.library.utoronto.ca/bitstream/1807/11181/1/Ben-Tzvi\\_Pinhas\\_200806\\_PhD\\_thesis.pdf](https://tspace.library.utoronto.ca/bitstream/1807/11181/1/Ben-Tzvi_Pinhas_200806_PhD_thesis.pdf). PhD Thesis. University of Toronto.
- [7] I. MOURIKIS, Anastasios, Stergios I. ROUMELIOTIS, Daniel M. HELMICK a Larry MATTHIES. Autonomous Stair Climbing for Tracked Vehicles. The International Journal of Robotics Research [online]. 2007, , 1-18 [cit. 2016-11-30]. Dostupné z: <http://www.ee.ucr.edu/~mourikis/papers/Mourikis2007-Stairclimbing.pdf>
- [8] M. HELMICK, Daniel, Stergios I. MOURIKIS a Larry MATHIES. Multi-Sensor, High Speed Autonomous Stair Climbing. Intelligent Robots and Systems: IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems [online]. 2002, , 1-10 [cit. 2016-11-30]. Dostupné z: [https://www-robotics.jpl.nasa.gov/publications/Daniel\\_Helmick/final\\_submitted\\_layout\\_changed.pdf](https://www-robotics.jpl.nasa.gov/publications/Daniel_Helmick/final_submitted_layout_changed.pdf)
- [9] Octopus - An Autonomous Wheeled Climbing Robot with Tactile Wheels. ETH Zurich [online]. Zurich [cit. 2016-11-30]. Dostupné z: <http://www.asl.ethz.ch/research/edutainment-robots.html>
- [10] SUN, Yi, Yang YANG, Shungen MA a Huayan PU. Design of a high-mobility multi-terrain robot based on eccentric paddle mechanism. SpringerOpen [online]. 2016, , 1-22 [cit. 2016-11-30]. DOI: 10.1186/s40638-016-0041-3. Dostupné z: <https://jrobo.springeropen.com/articles/10.1186/s40638-016-0041-3>
- [11] H. WILCOX, Brian, Todd LITWIN, Jeff BIESIADECKI, Jaret MATTHEWS, Matt HEVERLY a Jack MORRISON. ATHLETE: A Cargo Handling and Manipulation Robot for the Moon. Journal of Field Robotics [online]. 2007, , 1-14 [cit. 2016-11-30]. DOI: 10.1002/rob.20193. Dostupné z: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/rob.20193/pdf>

- [12] ESTIER, T., Y. CRAUSAZ, B. MERMINOD a R. SIEGWART. An Innovative Space Rover with Extended Climbing Abilities [online]. 2000, , 1-7 [cit. 2016-11-30]. DOI: 10.1061/40476(299)44. Dostupné z: <http://e-collection.library.ethz.ch/eserv/eth:8362/eth-8362-01.pdf>
- [13] BLECHA, Petr. Management technických rizik u výrobních strojů. Brno: Vědecké spisy Vysokého učení technického v Brně, 2010. Habilitační a inaugurační spisy, sv. 343. ISSN 1213-418X.
- [14] NOVÁK, Pert. Mobilní roboty: pohony, senzory, řízení. 1. vyd. Praha: BEN, 2005. 248 s. ISBN 80-7300-141-1.
- [15] ČSN EN ISO 12100. Bezpečnost strojních zařízení – Všeobecné zásady pro konstrukci – Posouzení rizika a snižování rizika. 2011.
- [16] KOLÍBAL, Zdeněk a Radek KNOFLÍČEK. Morfologická analýza stavby průmyslových robotů. 1. vyd. Košice: Viena, 2000, 178 s. Edice vědecké a odborné literatury. ISBN 80-889-2227-5.
- [17] KNOFLÍČEK, Radek. Mobilní robotické systémy. [Brno: Vysoké učení technické], 1996, [111] s.
- [18] ING. KORVINY, Petr. *Teoretické základy vícekritériálního rozhodování* [online]. [cit. 2017-05-25]. Dostupné z: [http://korviny.cz/mca7/soubory/teorie\\_mca.pdf](http://korviny.cz/mca7/soubory/teorie_mca.pdf)
- [19] Nanotec. Nanotec Plug and drive [online]. Munich [cit. 2017-05-20]. Dostupné z: <https://en.nanotec.com/products/648-db87-brushless-ec-servo-motor/>
- [20] Bosch Rexroth. *Rexroth Bosch Group: Aluminum profiles: Products* [online]. [cit. 2017-05-20]. Dostupné z: <https://www.boschrexroth.com/en/xc/products/product-groups/assembly-technology/aluminum-profiles-solutions-components/aluminum-profiles-products/index>
- [21] Tyma s.r.o.: 25T10-1100 DL. : *Ozubený řemen oboustranný* [online]. [cit. 2017-05-20]. Dostupné z: <https://www.tyma.cz/produkty/detail/25t10-1100-dl-29863/>
- [22] Ametric: 40T10/60 0 [online]. [cit. 2017-05-25]. Dostupné z: <http://www.ametric.com/p-14362-40t1060-0.aspx>
- [23] Ametric: 40T10/20 2 [online]. [cit. 2017-05-25]. Dostupné z: <http://www.ametric.com/p-14349-40t1020-2.aspx>
- [24] HA ATTO: *LiFePo4 baterie – vlastnosti* [online]. [cit. 2017-05-25]. Dostupné z: <http://www.ha-atto.cz/lifepo4-baterie-vlastnosti/>
- [25] Alibaba: *IEC Chassis Mains Kettle Socket with waterproof cover* [online]. [cit. 2017-05-25]. Dostupné z: [https://www.alibaba.com/product-detail/IEC-Chassis-Mains-Kettle-Socket-with\\_1645216145.html](https://www.alibaba.com/product-detail/IEC-Chassis-Mains-Kettle-Socket-with_1645216145.html)
- [26] Eberry: *Prachový filtr k DOMO DO150A* [online]. [cit. 2017-05-25]. Dostupné z: [https://www.eberry.cz/prachovy-filtr-k-domo-do150a?gclid=CNGg\\_Y32xNMCFY8Q0w0dpK8FDA](https://www.eberry.cz/prachovy-filtr-k-domo-do150a?gclid=CNGg_Y32xNMCFY8Q0w0dpK8FDA)
- [27] Alibaba: *High dust holding capacity filter paper* [online]. [cit. 2017-05-25]. Dostupné z: [https://www.alibaba.com/product-detail/High-Quality-Competitive-Price-High-dust\\_60322110904.html](https://www.alibaba.com/product-detail/High-Quality-Competitive-Price-High-dust_60322110904.html)

- [28] *Mouser electronics: CUI CFM-8010-13-10* [online]. [cit. 2017-05-25]. Dostupné z: <http://cz.mouser.com/ProductDetail/CUI/CFM-8010-13-10/?qs=sGAEpiMZZMup2DON%252biRg9GeVne6jQckZhHa81PlcozdEcUIT8gql0Q%3D%3D>
- [29] *Vzduchotechnika-levne: Čtyřhranné mřížky- krytka NVM 100 x 100 K* [online]. [cit. 2017-05-25]. Dostupné z: [https://www.vzduchotechnika-levne.cz/ventilator/vetraci-mrizky\\_716/kovove-hranate-vetraci-mrizky-na-fasadu/produkt/ctyrhranne-mrizky--krytka-nvm-100-x-100-k](https://www.vzduchotechnika-levne.cz/ventilator/vetraci-mrizky_716/kovove-hranate-vetraci-mrizky-na-fasadu/produkt/ctyrhranne-mrizky--krytka-nvm-100-x-100-k)
- [30] *Alcomex pružiny: Tlačné pružiny* [online]. [cit. 2017-05-25]. Dostupné z: <http://www.alcomex.cz/vyrobky/tlacne-pruziny/>
- [31] *Mateza: Pryžový profil EPDM mikroporézni samolepici* [online]. [cit. 2017-05-25]. Dostupné z: <http://www.mateza.cz/e-shop/pryzovy-profil-epdm-mikroporezni-samolepici-40-x-5-mm>
- [32] *Tea Technik: Ocelová kuželová soukolí* [online]. [cit. 2017-05-25]. Dostupné z: <http://www.teatechnik.cz/ocelova/>
- [33] *Aliexpress: 48V 20AH electric bike LiFePO4 battery* [online]. [cit. 2017-05-25]. Dostupné z: <https://www.aliexpress.com/item/48V-20AH-electric-bike-LiFePO4-battery-for-1000W-motor-electric-wheelchair-1500-times-cycle-battery-with/32765837230.html?spm=2114.40010208.4.35.Y8fFjE>
- [34] *Profily: Těsnění z kompaktních pryží EPDM 60 Sha* [online]. [cit. 2017-05-25]. Dostupné z: <http://www.profily.cz/cs/katalog-vyrobku/tesneni-z-kompaktnich-pryzi-epdm-60-sha/>
- [35] *Materialise: Výrobky a služby* [online]. [cit. 2017-05-25]. Dostupné z: <http://www.materialise.com/cs/manufacturing>





# 10 SEZNAM ZKRATEK, SYMBOLŮ, OBRÁZKŮ A TABULEK

## 10.1 Seznam zkratk

$a$	Zrychlení	$[m/s^2]$
$F_C$	Celková potřebná síla pro pohyb robotu po nakloněné rovině	$[N]$
$F_W$	Síla potřebná k překonání výškového rozdílu	$[N]$
$F_a$	Odpor způsobený setrvačností posuvných hmot	$[N]$
$F_f$	Síla třecích odporů	$[N]$
$F_s$	Odpor způsobený setrvačností rotujících hmot	$[N]$
$g$	Tíhové zrychlení	$[m/s^2]$
$G_{1/4}$	Reakce podložky na rameno robotu	$[N]$
$g_n$	Váha faktoru	$[-]$
$i_{OK}$	Převodový poměr ozubeného pastorku a ozubeného věnce	$[-]$
$i_R$	Převodový poměr pásového pohonu	$[-]$
$J_C$	Celkový moment setrvačnosti vztažený na osu hřídele motoru [	$kg \cdot m^2]$
$J_{MR}$	Moment setrvačnosti malé řemenice $8,26 \cdot 10^{-5}$	$[kg \cdot m^2]$
$J_{poh}$	Celkový moment setrvačnosti sestavy pohonu	$[kg \cdot m^2]$
$J_{VR}$	Moment setrvačnosti velké řemenice	$[kg \cdot m^2]$
$L_R$	Velikost ramene momentu	$[m]$
$m$	Hmotnost pásového robotu	$[kg]$
$M_{K2}$	Zredukovaný krouticí moment na hřídel pastorku	$[N \cdot m]$
$M_{KP}$	Krouticí moment potřebný k otočení ramene okolo bodu A	$[N \cdot m]$
$M_{k1}$	Požadovaný moment poháněné velké řemenice	$[N \cdot m]$
$M_{k1}$	Skutečný krouticí moment pohonu jízdy	$[N \cdot m]$
$M_{k2}$	Skutečný krouticí moment pohonu otočného ramene	$[N \cdot m]$
$n_1$	Požadované otáčky na výstupu z převodovky motoru	$[s^{-1}]$
$n_2$	Výstupní otáčky	$[s^{-1}]$
$n_{cn2}$	Výstupní otáčky pohonu otočného ramene	$[s^{-1}]$
$n_{Cr}$	Výstupní otáčky otočného ramene	$[s^{-1}]$
$P_m$	Předběžný celkový výkon motoru	$[W]$
$P_{m2}$	Předběžný celkový výkon motoru	$[W]$
$P_{mc}$	Upravený celkový potřebný výkon má pak podobu	$[W]$
$P_{mc1}$	Celkový potřebný výkon jednoho pohonu	$[W]$
$p_\tau$	Hodnocení faktor	$[%]$

$r_k$	Poloměr poháněného kola	[m]
$r_{k2}$	Poloměr ozubeného pastorku	[mm]
$t_j$	Hodnota faktoru	[-]
$T_n$	Faktor varianty	[-]
$v$	Rychlost po nakloněné rovině	[m/s]
$v_2$	Rychlost ozubeného pastorku	[m/s]
$v_{Cn1}$	Skutečná rychlost robotu	[m/s]
$v_{Cn2}$	Skutečná rychlost otočného ramene	[m/s]
$\alpha$	Úhel nakloněné roviny	[°]
$\xi$	Technicko-ekonomická hodnota	[-]
$\mu$	Trakční součinitel tření	[-]
$\tau$	Technická hodnota	[-]

## 10.2 Seznam obrázků

Obr. 1)	Systémový model servisního robotu [2]	19
Obr. 2)	Rozdělení pohybových mechanismů mobilních robotů [1]	21
Obr. 3)	Schéma obecného modelu kolového MSR [2]	21
Obr. 4)	Koncepce diferenčního řízení natáčení podvozku [2]	23
Obr. 5)	Koncepce přímého natáčení směrových kol [2]	23
Obr. 6)	Schéma Ackermannova řízení [2]	24
Obr. 7)	Schéma systémového modelu subsystému mobility podvozku [2]	25
Obr. 8)	Pásový robot v rámci diplomového projektu VŠB Ostrava [3]	27
Obr. 9)	Odhalení vnitřních částí robotu [3]	27
Obr. 10)	Kolový robot z VŠB Ostrava určený pro monitoring v terénu [4]	28
Obr. 11)	Podvozek s Weinsteinovými koly [5]	29
Obr. 12)	Využití jednotlivých uspořádání robotu při jízdě po schodech [6]	30
Obr. 13)	Autonomní pásový schodolez a jeho perspektiva při jízdě do schodů [7]	31
Obr. 14)	Autonomní pásový schodolez s proměnou kinematikou pásů [8]	31
Obr. 15)	Detailní popis a vnější rozměry robota s taktilními koly [9]	32
Obr. 16)	Excentrický mechanismus vysouvání lopatek [10]	33
Obr. 17)	Zdolávání členitých a schodovitých překážek [10]	33
Obr. 18)	Vesmírný robot Athlete a jeho uspořádání [11]	34
Obr. 19)	Uspořádání vesmírného robotu se znázorněnou funkcí pohybu [12]	34

Obr. 20)	Pozice otočného čepu paralelní nápravy [12]	35
Obr. 21)	Schématický obrázek čtyřpásového robotu varianty A	37
Obr. 22)	Schématický obrázek čtyřstopého pásového robotu varianty B	37
Obr. 23)	Schématický obrázek šestikolového robotu varianty C	38
Obr. 24)	Schématický obrázek pásového robotu s otočnými rameny varianty	39
Obr. 25)	Schématický obrázek kolového článkového robotu varianty E	39
Obr. 26)	Vnější stavba čtyřpásového podvozku	43
Obr. 27)	Hlavní celky pásového podvozku	43
Obr. 28)	Mechanismus pohybů pásového podvozku	44
Obr. 29)	Rozbor sil působících na podvozek při jízdě na nakloněné rovině	45
Obr. 30)	Rozbor sil působících na otočné rameno podvozku	47
Obr. 31)	Modulární systém pohonu	50
Obr. 32)	Detail sestavy otočného ramene	52
Obr. 33)	Komponenty pohonů pracovních pohybů robotu	53
Obr. 34)	Rozpadlý pohled napínacího mechanismu ozubeného řemene	54
Obr. 35)	Řez velkou řemenicí	54
Obr. 36)	Konstrukce nosného rámu	55
Obr. 37)	Uchycení pomocí T-matic a úhlových spojek [20]	55
Obr. 38)	Konstrukční detaily bočnice nosného rámu	56
Obr. 39)	Upínací rotační příruba	56
Obr. 40)	Sestava akumulátoru	58
Obr. 41)	Sestava pro ventilaci vnitřního prostoru pásového podvozku	59
Obr. 42)	Sací průduch krytování	59
Obr. 43)	Ventilační průduch krytování	59
Obr. 44)	Konektor napájení akumulátorů [27]	60
Obr. 45)	Umístění napájecích konektoru na nosném rámu	60
Obr. 46)	Zbytkový vnitřní prostor robotu	60
Obr. 47)	Vnější krytování nosného rámu	61
Obr. 48)	Blokové schéma čtyřpásového mobilního podvozku	63
Obr. 49)	Schéma určení hodnoty rizik [13]	66
Obr. 50)	Nájezd na schodovitou překážku	71
Obr. 51)	Výjezd po nakloněné rovině a schodech - 1	71
Obr. 52)	Výjezd po nakloněné rovině a schodech - 2	71
Obr. 53)	Nadzvednutí pásů k snížení valivého odporu	72
Obr. 54)	Maximální světlá výška podvozku	72

### 10.3 Seznam tabulek

Tab 1)	Systémový model servisního robotu, klasický mechanický přístup [2]	20
Tab 2)	Tabulka posuzovaných vlastností jednotlivých variant	40
Tab 3)	Hodnoty faktorů a význam vah u jednotlivých variant	41
Tab 4)	Hodnoty faktorů a význam vah u jednotlivých variant	41
Tab 5)	Charakteristiky zvoleného pohonu Nanotec [19]	49
Tab 6)	Vlastnosti zvolené brzdy [19]	49
Tab 7)	Pohon jízdy robotu [19]	50
Tab 8)	Pohon otáčení ramene s pásy [19]	50
Tab 9)	Proudové odběry	57
Tab 10)	Parametry zvoleného akumulátoru [33]	58
Tab 11)	Zjištění nebezpečí	65
Tab 12)	Analýza nebezpečných komponent	66
Tab 13)	Vysvětlení složek hodnotících rizika [13]	67
Tab 14)	Vypočítané hodnoty rizik	67
Tab 15)	Výsledné parametry mobilního zařízení	69
Tab 16)	Výsledné náklady na výrobu prototypu	70

## 11 SEZNAM PŘÍLOH

CD:

Příloha 1 – 3D Model

Příloha 2 – Výkresová dokumentace

Příloha 3 – Multikriteriální hodnocení

Příloha 4 – Pevnostní kontrola spojů

Příloha 5 – Ložisko 6007

Příloha 6 – Ložisko 6005

Příloha 7 – Ložisko 6203

Příloha 8 – Návrh tlačné pružiny

Příloha 9 – Ozubený převod s přímými zuby

Příloha 10 – Kuželové soukolí

Příloha 11 – Kontrola lisovaného spoje kuželového kola

Příloha 12 – Cenové zhodnocení

Příloha 13 – Blokové schéma